

**FERTILIZACIÓN NITRÓGENO-AZUFRA Y VARIABILIDAD
GENOTÍPICA EN EL RENDIMIENTO Y LA CALIDAD DE GRANO EN
COLZA-CANOLA (*Brassica napus* L.)**

Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos
Aires, Área Producción Vegetal

María Belén Agosti

Ingeniera Agrónoma
2004 - Universidad de Buenos Aires
Especialista en Cultivo de Granos
2007 - Universidad de Buenos Aires



*Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires*



COMITÉ CONSEJERO

Daniel J. Miralles

Ingeniero Agrónomo - Universidad de Buenos Aires
Doctor - Universidad de Buenos Aires

Consejeros de Estudios

Deborah P. Rondanini

Ingeniera Agrónoma - Universidad de Buenos Aires
Doctora - Universidad de Buenos Aires

Ma. del Pilar Vilariño

Ingeniera Agrónoma - Universidad de Buenos Aires
Magister - Universidad de Buenos Aires

JURADO DE TESIS

Daniel J. Miralles

Ingeniero Agrónomo - Universidad de Buenos Aires
Doctor - Universidad de Buenos Aires (Argentina)

JURADO

Antonio Hall

Ingeniero Agrónomo - Universidad de Buenos Aires
Ph.D. - Macquarie University (Australia)

JURADO

Pablo Prystupa

Ingeniero Agrónomo - Universidad de Buenos Aires
Ms. Sci. - Universidad de Buenos Aires (Argentina)

Fecha de defensa de la tesis: 05 de Agosto de 2011

"Tal vez no exista imagen más hermosa que la de unas manos moldeando el barro, tal vez sólo la imagen de una mano que está haciendo nacer de la blancura del papel el discurso del mundo..."

José Saramago

Dedicada a todos los "Alfareros" que aportaron sus manos para moldear mi barro, en lo profesional, pero sobre todo en lo humano...

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a las personas que me ayudaron a tomar la decisión de emprender este camino y me apoyaron a cada instante: mi familia, María José, Renée, Belén, Claudia...

A Daniel Miralles y Deborah Rondanini, que tuvieron toda la paciencia y dedicación conmigo, que me formaron en lo profesional y lo personal... gracias!

A mis compañeros de oficina, que me aguantaron en la alegría y la desesperación, que supieron contenerme, acompañarme, aconsejarme: Claudia, Raúl, Fernando, Paula...

A todos los integrantes de la Cátedra de Cultivos Industriales con los que compartí gran parte del tiempo transcurrido estos años: especialmente a Adriana K., Alejandra G., Daniel S., Mónica L. y Elba D. También especialmente a Mirta y Alicia que tanto me ayudaron en lo administrativo, y a Juan y Luis que me ayudaron en el cuidado de los ensayos.

A mis compañeras del “*canola team*”: Nora, Pilar y Deborah, y a los integrantes del grupo “*trigo*” con quienes hemos compartido largas horas de reunión...

A varios docentes de FAUBA que amablemente me ayudaron con los ensayos e interpretación de los datos: Sebastián Arisnabarreta, Pablo Prystupa, Ignacio Alzueta, Marta Divo, Mario Clozza, Norberto Bartoloni, Susana Perelman...

Un agradecimiento también a Daniel S. y Anotnio D.H., quienes me brindaron la posibilidad de viajar a España en el marco de esta maestría, una experiencia que ha sido muy fructífera para mi, por los aportes en relación a mi tesis, pero especialmente por la experiencia de vivir allá y de sentirme tan cuidada...

A Diego Castro quien fue de gran ayuda en las determinaciones de calidad, por su paciencia y esfuerzo en el trabajo realizado, así como también por su hospitalidad en tierras riojanas.

A la Cámara Arbitral de Cereales de Bahía Blanca, quien a través de Noemí Fritz, financió gran parte de los análisis de calidad del grano realizados en el presente trabajo.

A las empresas que comercializan colza-canola en el país, por hacernos llegar la semilla necesaria para los diferentes ensayos.

Y de manera especial agradecer a la Federación de Centros y Entidades Gremiales de Acopiadores de Cereales (Buenos Aires), quien a través de la gestión de Raúl Tomás, Miguel Di Rosso y Armando Casalins, financió mis estudios de postgrado.

INDICE GENERAL

Contenido	Página
COMITÉ CONSEJERO	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
INDICE GENERAL	V
INDICE DE TABLAS	VII
INDICE DE FIGURAS	X
DECLARACIÓN	XV
ABREVIATURAS UTILIZADAS	XVI
RESUMEN	XVII
ABSTRACT	XVIII

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN GENERAL, OBJETIVOS E HIPÓTESIS

1.1. Introducción general	2
1.1.1. Importancia del cultivo, nivel de producción y usos del grano de colza-canola	2
1.2. Marco conceptual, objetivos e hipótesis	2
1.2.1. Variabilidad genotípica del rendimiento y la calidad comercial del grano	3
1.2.2. Generación del rendimiento y sus componentes	4
1.2.3. Generación de la calidad comercial del grano	9
1.3. Estructura de la tesis	12

CAPÍTULO 2

VARIABILIDAD EN EL RENDIMIENTO Y LA CALIDAD COMERCIAL DE GRANO EN DISTINTOS GENOTIPOS DE COLZA-CANOLA

2.1. Introducción	14
2.2. Materiales y Métodos	15
2.2.1. Descripción de los experimentos	15
2.2.2. Mediciones	17
Fenología	17
Rendimiento y calidad comercial del grano	17
2.2.3. Análisis estadísticos	18
2.3. Resultados	19
2.3.1. Variabilidad en la fenología y el rendimiento	19
2.3.2. Variabilidad en la calidad comercial del grano	23
2.3.3. Análisis de las condiciones ambientales durante el PCr y el llenado de granos	27
2.4. Discusión	32
2.5. Conclusiones	36

CAPÍTULO 3

FERTILIZACION CON NITRÓGENO Y AZUFRE DURANTE EL CICLO DE CULTIVO: EFECTO SOBRE LOS COMPONENTES FISIOLÓGICOS DEL RENDIMIENTO

3.1. Introducción	39
3.2. Materiales y Métodos	40

	Contenido	Página
3.2.1.	Descripción de los experimentos	40
3.2.2.	Mediciones	42
	Fenología y dinámica de aparición de órganos reproductivos	42
	Biomasa, rendimiento y componentes	43
	Eficiencia de uso del nitrógeno	44
3.2.3.	Análisis estadísticos	45
3.3.	Resultados	45
3.3.1.	Fenología	45
3.3.2.	Producción de biomasa y sus componentes fisiológicos	46
3.3.3.	Rendimiento en grano y sus componentes numéricos	53
3.3.4.	Eficiencia de uso del nitrógeno	61
3.4.	Discusión	63
3.5.	Conclusiones	67
 <u>CAPÍTULO 4</u>		
FERTILIZACION CON NITRÓGENO Y AZUFRE DURANTE EL CICLO DE CULTIVO: EFECTO SOBRE LA CALIDAD DEL GRANO		
4.1.	Introducción	70
4.2.	Materiales y Métodos	71
4.2.1.	Descripción de los experimentos	71
4.2.2.	Mediciones	71
	Calidad final del grano	71
	Dinámica del peso seco y el perfil de ácidos grasos del grano	72
	Condiciones ambientales durante el llenado de los granos	73
4.2.3.	Análisis estadísticos	73
4.3.	Resultados	74
4.3.1.	Calidad final del grano	74
4.3.2.	Dinámica del peso seco y el perfil de ácidos grasos del grano	83
4.3.3.	Respuestas de la calidad de grano a las condiciones ambientales postfloración	87
4.4.	Discusión	88
4.5.	Conclusiones	92
 <u>CAPÍTULO 5</u>		
DISCUSIÓN GENERAL		
5.1.	Síntesis de los resultados obtenidos y contraste de hipótesis	95
5.1.1.	Estrategias para maximizar el rendimiento en grano	95
	Elección de genotipos para maximizar el rendimiento	95
	Fertilización con N y S para maximizar el rendimiento	98
5.1.2.	Estrategias para maximizar la calidad del grano	101
	Elección de genotipos para maximizar la calidad	101
	Fertilización con N y S para maximizar la calidad	104
5.2.	Aspectos no resueltos, interrogantes planteados e investigaciones futuras	106
5.3.	Conclusiones generales	107
 REFERENCIAS		 109
ANEXO		120

INDICE DE TABLAS

Contenido	Página
Tabla 2.1. <i>Materiales comerciales de colza-canola incluidos en el análisis de la variabilidad del rendimiento y la calidad comercial del grano en Buenos Aires en dos años de ensayo. Filas grises corresponden a genotipos de ciclo primaveral corto, filas blancas a los de ciclo primaveral medio y filas negras a los de ciclo invernal, clasificados según el modelo de predicción fenológica CRONOCANOLA©.</i>	16
Tabla 2.2. <i>Análisis del suelo a la siembra (0-20cm de profundidad) de los ensayos de genotipos comerciales de colza-canola en los años 2007 y 2008. Análisis realizados en el INGEIS (Instituto de Geocronología y Geología Isotópica, UBA-CONICET).</i>	17
Tabla 2.3. <i>Rendimiento en grano en kg ha^{-1} (Rto) y momento de ocurrencia del inicio de floración (IFl) para diferentes materiales comerciales de colza-canola evaluados en Buenos Aires en dos años. Las filas grises corresponden a los genotipos de ciclo primaveral corto, las filas blancas a los de ciclo primaveral medio y las filas negras a los de ciclo invernal.</i>	22
Tabla 2.4. <i>Contenido de aceite en % (% AC), rendimiento en aceite en kg ha^{-1} (Rto AC) y contenido de glucosinolatos en $\mu\text{moles g}^{-1}$ (GLU) para diferentes materiales comerciales de colza-canola evaluados en Buenos Aires en dos años (2007 y 2008). Las filas grises corresponden a los genotipos de ciclo primaveral corto, las filas blancas a los de ciclo primaveral medio y las filas negras a los de ciclo invernal.</i>	25
Tabla 2.5. <i>Contenido final de ácidos grasos saturados (SAT), ácido oleico (18:1), ácido linoleico (18:2), ácido linolénico (18:3) y ácido erúico (22:1), todos como % del total, para diferentes materiales comerciales de colza-canola evaluados en Buenos Aires en dos años (2007 y 2008). Las filas grises corresponden a los genotipos de ciclo primaveral corto, las filas blancas a los de ciclo primaveral medio y las filas negras a los de ciclo invernal.</i>	26
Tabla 2.6. <i>Matriz de correlación entre el rendimiento en grano (Rto), contenido de aceite (%AC), rendimiento en aceite (Rto AC), contenido de glucosinolatos (GLU), ácidos grasos saturados (SAT), ácido oleico (18:1), ácido linoleico (18:2), ácido linolénico (18:3), ácido erúico (22:1), temperatura mínima (Temp Min), media (Temp Med) y máxima (Temp Max) durante postfloración y RFA incidente acumulada durante postfloración (RFA inc Ac) para todos los materiales comerciales evaluados en Buenos Aires en dos años (2007 y 2008). En negrita se resaltaron los coeficientes \geq al módulo de 0,50.</i>	30
Tabla 3.1. <i>Análisis químico del sustrato utilizado en los contenedores al inicio de cada ensayo en los años 2006, 2007 y 2008.</i>	40
Tabla 3.2. <i>Cantidad (kg ha^{-1}) de N (N-nitratos y amonio) y S (S-sulfatos) disponibles para el cultivo en tratamientos N_0, N_1, S_0 y S_1 en los tres años de ensayo (2006, 2007 y 2008).</i>	41
Tabla 3.3. <i>Temperaturas mínimas, máximas y media ($^{\circ}\text{C}$) y radiación fotosintéticamente activa incidente promedio (MJ m^{-2}) en las etapas pre y postfloración en tres años (2006, 2007 y 2008).</i>	42
Tabla 3.4. <i>Descripción de los estado ontogénicos del cultivo de colza de acuerdo a la escala de CETIOM (Arnoud, 1989) y aquella modificada por Gómez y Miralles (2006).</i>	42

Contenido	Página
Tabla 3.5. Duración de las etapas siembra-emergencia (Sbr-E), emergencia-roseta (E-R), roseta-inicio de elongación del tallo (R-IElg), inicio de elongación del tallo-botón floral visible (IElog-BFV), botón floral visible-inicio de floración (BFV-IFl), inicio de floración-inicio de fructificación (IFl-IFr), inicio de fructificación-madurez fisiológica (IFr-MF) y del ciclo total (E-MF) en tiempo térmico ($t_{base}=0\text{ }^{\circ}\text{C}$) y días para dos genotipos (Filial UofA y Eclipse) y dos tratamientos de fertilización (N_0 y N_1) en los tres años (2006, 2007 y 2008).	46
Tabla 3.6. Biomasa de tallos (BT), biomasa de silicuas (BS), biomasa de raíces total (BRT), biomasa de raíces principales (BRP), biomasa de raíces secundarias (BRS) y relación raíz:tallo para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (Filial UofA y Eclipse) en los tres años (2006, 2007 y 2008). Los códigos de los tratamientos y las dosis de fertilizante aplicados en cada año están descriptos en la Tabla 3.2.	49
Tabla 3.7. Radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada desde E a MF en MJ m^{-2} (RFAint Ac), eficiencia en el uso de la radiación en g MJ^{-1} (EUR) y EUR corregida en g glucosa MJ^{-1} (EURc) para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (Filial UofA y Eclipse) en los tres años (2006, 2007 y 2008). Los códigos de los tratamientos y las dosis de fertilizante aplicados en cada año están descriptos en la Tabla 3.2.	52
Tabla 3.8. Número de silicuas por m^2 (NS), número de granos por silicua (NGS), número de granos por m^2 (NG), peso de mil granos (PG) e índice de cosecha (IC) para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (Filial UofA y Eclipse) en los tres años (2006, 2007 y 2008). Los códigos de los tratamientos y las dosis de fertilizante aplicados en cada año están descriptos en la Tabla 3.2.	55
Tabla 3.9. Ajuste (r^2), tasa (flores día^{-1}) y fin de aparición de flores (día) de las ecuaciones bi-lineales de la evolución del número de flores en el tiempo para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (Filial UofA y Eclipse) en los tres años (2006, 2007 y 2008). Los códigos de los tratamientos y las dosis de fertilizante aplicados en cada año están descriptos en la Tabla 3.2.	61
Tabla 4.1. Contenido de aceite en % (% AC), rendimiento de aceite en kg ha^{-1} (Rto. AC), contenido de glucosinolatos en $\mu\text{moles g}^{-1}$ (GLU) y contenido de proteínas en % (% PRO) para todos los tratamientos de fertilización con N y S en dos genotipos (Filial UofA y Eclipse) y tres años (2006, 2007 y 2008). Los códigos de los tratamientos están descriptos en la Tabla 3.2. El año 2006, a excepción de %PRO, no fue incluido en el análisis estadístico por carecer de repeticiones verdaderas.	76
Tabla 4.2. Contenido final de ácidos grasos saturados (SAT), ácido oleico (18:1), ácido linoleico (18:2), ácido linolénico (18:3) y ácido erúxico (22:1), todos como % del total, para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (Filial UofA y Eclipse) en los tres años (2006, 2007 y 2008). Los códigos de los tratamientos están descriptos en la Tabla 3.2. El año 2006 no fue incluido en el análisis estadístico por carecer de repeticiones verdaderas.	81

Contenido**Página**
85

Tabla 4.3. Tasa de acumulación de peso seco del grano (mg día^{-1}), momento de ocurrencia de madurez fisiológica (días desde inicio de floración), peso seco final (mg) y duración del llenado efectivo (días) para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (Filial UofA y Eclipse) en dos años (2007 y 2008). Los valores entre paréntesis muestran el error estándar. Los códigos de los tratamientos están descriptos en la Tabla 3.2.

Tabla A.1. Duración de la etapa emergencia-inicio de floración (E-IFl), inicio de floración-madurez fisiológica (IFl-MF) y emergencia-madurez fisiológica (E-MF) en días y E-MF en tiempo térmico ($^{\circ}\text{Cd}$) para diferentes materiales comerciales de colza-canola evaluados en Buenos Aires en dos años (2007 y 2008). Las filas grises corresponden a los genotipos de ciclo primaveral corto, las filas blancas a los de ciclo primaveral medio y las filas negras a los de ciclo invernal.

120

INDICE DE FIGURAS

Contenido	Página
Fig. 1.1. Esquema indicando las distintas etapas ontogénicas de colza-canola y los componentes del rendimiento que se generan a lo largo del desarrollo del cultivo (Sbr) siembra, (E) emergencia, (CA) cambio de ápice, (BFV) botón floral visible, (IFl) inicio de floración, (IFr) inicio de fructificación, (MF) madurez fisiológica. En la parte superior del gráfico se superpuso la escala CETIOM. El recuadro señala la ventana crítica para la definición del rendimiento. Adaptado de Gómez y Miralles (2006).	5
Fig. 2.1. Duración promedio (días) de la etapa emergencia-inicio de floración (E-IFl, barras blancas) e inicio de floración-madurez fisiológica (IFl-MF, barras rayadas para tres grupos de genotipos de colza-canola (PC: primaveral corto, PM: primaveral medio e INV: invernial) evaluados en Buenos Aires en dos años (2007 y 2008). Los números sobre las barras blancas indican la duración en días de la etapa E-IFl y los números al final de las barras rayadas indican la duración total del ciclo (E-MF) \pm error estándar dentro de cada grupo y el número de genotipos incluidos en cada caso.	19
Fig. 2.2. Relación entre la duración de la etapa postfloración (IFl-MF) y la etapa prefloración (E-IFl) expresadas en a) días y b) tiempo térmico ($^{\circ}\text{Cd}$) para diferentes genotipos de colza-canola evaluados en Buenos Aires en dos años (2007 en círculos y 2008 en triángulos). Los símbolos grises corresponden a los genotipos de ciclo primaveral corto (PC), los blancos a los de ciclo primaveral medio (PM) y los negros a los de ciclo invernial (INV). Se incluyen isolíneas de duración del ciclo total (E-MF, líneas diagonales llenas) en días (entre 150 y 230 días) y tiempo térmico (entre 1600 y 3600 $^{\circ}\text{Cd}$). Las líneas punteadas agrupan puntos de cada año experimental.	20
Fig. 2.3. Diagramas de caja y bigote representando la variabilidad en el rendimiento en grano (kg ha^{-1}) para tres grupos de genotipos de colza-canola (PC: primaveral corto, PM: primaveral medio e INV: invernial) evaluados en Buenos Aires en dos años (2007 y 2008). La cruz dentro de la caja muestra el rendimiento medio de cada grupo de genotipos. En la parte inferior de cada gráfico se indican los coeficientes de variación (%) de cada grupo.	21
Fig. 2.4. Relación entre el rendimiento en grano (kg ha^{-1}) y la duración de la etapa postfloración (IFl-MF) en días para los diferentes genotipos de colza-canola evaluados en Buenos Aires en dos años (2007 en círculos y 2008 en triángulos). Los símbolos grises corresponden a los genotipos de ciclo primaveral corto (PC), los blancos a los de ciclo primaveral medio (PM) y los negros a los de ciclo invernial (INV). Las barras muestran el error estándar.	23
Fig. 2.5. Relación entre el contenido de aceite del grano (%) y el rendimiento en grano (kg ha^{-1}) para diferentes genotipos de colza-canola evaluados en Buenos Aires en dos años (2007 en círculos y 2008 en triángulos). Los símbolos grises corresponden a los genotipos de ciclo primaveral corto (PC), los blancos a los de ciclo primaveral medio (PM) y los negros a los de ciclo invernial (INV).	24

Contenido**Página**
27

Fig. 2.6. Evolución de la temperatura mínima y máxima ($^{\circ}\text{C}$) y de la radiación fotosintéticamente activa incidente (RFAinc en $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) durante los años 2007 y 2008 en Buenos Aires. Las flechas grises indican la emergencia del cultivo en cada año y las flechas negras el inicio de floración promedio de cada grupo de genotipos: primaverales cortos (PC), primaverales medios (PM) e invernales (INV). La línea punteada marca los 30°C de temperatura, que indica la temperatura por encima de la cual el cultivo exploraría temperaturas supra-óptimas.

Fig. 2.7. Relación entre el rendimiento en grano (kg ha^{-1}) y a) la temperatura media ($^{\circ}\text{C}$), b) los residuales de la relación RFA incidente media ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) y Temperatura media ($^{\circ}\text{C}$), y c) el cociente fototermal ($\text{MJ RFAinc m}^{-2} \text{ día}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) en el período crítico (inicio de floración + 350 $^{\circ}\text{Cd}$) para diferentes genotipos de colza-canola evaluados en Buenos Aires en dos años (2007 en círculos y 2008 en triángulos). Los símbolos grises corresponden a los genotipos de ciclo primaveral corto (PC), los blancos a los de ciclo primaveral medio (PM) y los negros a los de ciclo invernal (INV).

Fig. 2.8. Relación entre a) el contenido de aceite (%), b) glucosinolatos ($\mu\text{moles g}^{-1}$) y c) ácido linolénico (%) y la temperatura media ($^{\circ}\text{C}$) durante el llenado de los granos (IFl-MF) para diferentes genotipos de colza-canola evaluados en Buenos Aires en dos años (2007 en círculos y 2008 en triángulos). Los símbolos grises corresponden a los genotipos de ciclo primaveral corto (PC), los blancos a los de ciclo primaveral medio (PM) y los negros a los de ciclo invernal (INV). Las barras indican el error estándar. En a) y b) se muestra un modelo bi-lineal, con puntos de quiebre de 19,3 y 17,6 $^{\circ}\text{C}$. Las pendientes por debajo del umbral son de 0 y 0,58; y por encima son de -2,9 y 2,5 para aceite y glucosinolatos, respectivamente.

Fig. 3.1. Biomasa aérea total (g m^{-2}) para los tratamientos de fertilización en dos genotipos (Filial UofA y Eclipse) durante tres años: a) 2006, b) 2007 y c) 2008. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos y genotipos dentro de cada año ($p < 0,05$). Las barras de error muestran el error estándar. Los códigos de los tratamientos y las dosis de fertilizante aplicados en cada año están descriptos en la Tabla 3.2.

Fig. 3.2. Fotos de raíces de colza-canola. A la izquierda se observa una raíz del tratamiento N_0 y a la derecha del tratamiento N_1 .

Fig. 3.3. Relación entre la biomasa radical total (g planta^{-1}) y la biomasa aérea total (g planta^{-1}), ambas medidas a cosecha del cultivo, para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (círculos: Filial UofA y triángulos: Eclipse) en dos años (2007 y 2008). Se muestran ajustes lineales a los datos (forzados a 0). Los símbolos vacíos corresponden a los tratamientos N_0 y los grises a los N_1 . Cada punto corresponde a una planta individual (5-6 por contenedor). Se incluyeron también los tratamientos con S.

Contenido	Página
Fig. 3.4. Rendimiento en grano en peso seco (g m^{-2}) para todos los tratamientos de fertilización en dos genotipos (Filial UofA y Eclipse) durante tres años: a) 2006, b) 2007 y c) 2008. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos y genotipos dentro de cada año ($p < 0,05$). Las barras de error muestran el error estándar. Los códigos de los tratamientos y las dosis de fertilizante aplicados en cada año están descriptos en la Tabla 3.2.	53
Fig. 3.5. Relación entre el rendimiento en grano (g m^{-2}) y la biomasa aérea total (g m^{-2}) para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (círculos: Filial UofA y triángulos: Eclipse) en tres años (2006, 2007 y 2008). Se muestran ajustes lineales a los datos (forzados a 0). Los símbolos vacíos corresponden a los tratamientos N_0 y los grises a los N_1 . Se incluyeron también los tratamientos con S.	56
Fig. 3.6. Relación entre el rendimiento (g m^{-2}) y a) el número de granos (granos m^{-2}) y b) el peso de mil granos (g) para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (círculos: Filial UofA y triángulos: Eclipse) en tres años (2006, 2007 y 2008). En a) se muestran ajustes lineales a los datos (forzados a 0). Los símbolos vacíos corresponden a los tratamientos N_0 y los grises a los N_1 . Se incluyeron también los tratamientos con S.	57
Fig. 3.7. Relación entre el peso de mil granos (g) y el número de granos por unidad de área (granos m^{-2}) para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (círculos: Filial UofA y triángulos: Eclipse) en tres años (2006, 2007 y 2008). Los símbolos vacíos corresponden a los tratamientos N_0 y los grises a los N_1 . Se incluyeron también los tratamientos con S.	57
Fig. 3.8. Relación entre el rendimiento (g m^{-2}) y el número de silicuas (silicuas m^{-2}) para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (círculos: Filial UofA y triángulos: Eclipse) en tres años (2006, 2007 y 2008). Se muestran ajustes lineales a los datos (forzados a 0). Los símbolos vacíos corresponden a los tratamientos N_0 y los grises a los N_1 . Se incluyeron también los tratamientos con S.	58
Fig. 3.9. Número de silicuas por planta en tallo principal (barras blancas) y ramas (barras grises) para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (Filial UofA y Eclipse) en tres años: a) 2006, b) 2007 y c) 2008. Los números entre paréntesis indican el porcentaje de silicuas en el tallo principal. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos y genotipos dentro de cada año ($p < 0,05$). Las barras de error muestran el error estándar correspondiente al número total de silicuas por planta. Los códigos de los tratamientos y las dosis de fertilizante aplicados en cada año están descriptos en la Tabla 3.2.	59
Fig. 3.10. Relación entre el número de silicuas fértiles y el número de flores abiertas en el tallo principal para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (círculos: Filial UofA y triángulos: Eclipse) en tres años (2006, 2007 y 2008). Se muestran ajustes lineales a los datos (forzados a 0) y la relación 1:1. Los símbolos vacíos corresponden a los tratamientos N_0 y los grises a los N_1 . Se incluyeron también los tratamientos con S.	60

Contenido**Página**
62

Fig. 3.11. Relación entre a) Nitrógeno disponible y rendimiento, b) Nitrógeno absorbido y rendimiento y c) Nitrógeno disponible y Nitrógeno absorbido, todos en kg ha^{-1} , para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (Filial UofA y Eclipse) en los tres años (2006, 2007 y 2008). Los símbolos blancos corresponden a los tratamientos S_0 y los grises a los S_1 .

Fig. 3.12. Relaciones entre el nitrógeno disponible (kg ha^{-1}) y a) el diferencial de N (N Absorbido-N Disponible) y b) la eficiencia agronómica en el uso del nitrógeno (kg grano kg^{-1} N disponible) para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (Filial UofA y Eclipse) en los tres años (2006, 2007 y 2008). La línea punteada señala en a) el diferencial de $N=0$ y en b) el punto mínimo de la polinómica.

63

Fig. 4.1. Relación entre el contenido porcentual de aceite (línea llena) y de proteína (línea punteada) y el nitrógeno disponible (kg ha^{-1}), para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (Filial UofA con símbolos blancos y Eclipse con símbolos grises) en los tres años (2006, 2007 y 2008). Las barras de error muestran el error estándar.

77

Fig. 4.2. Relación entre el rendimiento en aceite (g m^{-2}) y el nitrógeno disponible en kg ha^{-1} , para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (Filial UofA con símbolos blancos y Eclipse con símbolos grises) en los tres años (2006, 2007 y 2008). Las barras de error muestran el error estándar. Los tratamientos con S no mostraron diferencias respecto de N y por ello no se discriminan en la figura.

78

Fig. 4.3. Relación entre a) el contenido absoluto de aceite (mg grano^{-1}) y de proteína (mg grano^{-1}), y b) el contenido absoluto de proteína (mg grano^{-1}) y el nitrógeno disponible por grano (mg grano^{-1}), para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (Filial UofA y Eclipse) en los tres años de ensayo (2006, 2007 y 2008). Sólo se discriminan los tratamientos con nitrógeno (N_0 círculos blancos y N_1 círculos negros). La línea llena en a) muestra la relación 1:-1 (reemplazo perfecto de aceite por proteína). En b), la línea punteada indica el valor máximo observado de contenido de proteína en grano ($0,68 \text{ mg grano}^{-1}$), la línea llena muestra el ajuste lineal para los tratamientos N_0 y la línea cortada es el ajuste cuadrático para N_0 y N_1 .

79

Fig. 4.4. Relación entre el contenido porcentual de aceite (línea llena) y proteína (línea punteada) y el rendimiento en grano en g m^{-2} para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (Filial UofA con símbolos blancos y Eclipse con símbolos grises) en los tres años (2006, 2007 y 2008). Las barras de error muestran el error estándar.

79

Fig. 4.5. Relación entre el contenido porcentual de a) ácido erúico (22:1) y oleico (18:1); b) linoleico (18:2) y oleico (18:1), y c) linolénico (18:3) y linoleico (18:2) para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (Filial UofA con símbolos blancos y Eclipse con símbolos grises) en los tres años (2006, 2007 y 2008). La recta de ajuste en el panel a) incluyó sólo al genotipo Filial UofA, en el panel b) sólo al genotipo Eclipse y en el panel c) se estableció un único ajuste para ambos genotipos.

83

Contenido**Página**

Fig. 4.6. <i>Peso individual del grano (mg) en función de los días desde Inicio de Floración para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (Filial UofA con símbolos blancos y Eclipse con símbolos grises) en dos años (2007 y 2008). Las flechas indican los momentos de ocurrencia de madurez fisiológica (MF). Estrato de silicuas de la posición 11 a la 14.</i>	84
Fig. 4.7. <i>Peso individual del grano relativo a su peso máximo (%) en función de la duración relativa del llenado (%) respecto del momento en que se alcanzó la madurez fisiológica para todos los tratamientos de fertilización y los dos genotipos utilizados (Filial UofA y Eclipse) en dos años (2007 con círculos blancos y 2008 con círculos grises). Los datos fueron tomados en granos correspondientes al estrato de silicuas de las posiciones 11 a 14.</i>	86
Fig. 4.8. <i>Contenido de ácido oleico (18:1; ○ y ●), linoleico (18:2; △ y ▲) y linolénico (18:3; □ y ■), expresados en porcentaje, en función de los días desde Inicio de Floración para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (Filial UofA con símbolos blancos y Eclipse con símbolos grises) en dos años de ensayo (2007 y 2008). Las flechas indican madurez fisiológica. Los datos fueron tomados en granos correspondientes al estrato de silicuas de las posiciones 11 a 14.</i>	87
Fig. 4.9. <i>Contenido porcentual de ácido linolénico (18:3) y de ácidos grasos saturados (SAT) en función de la temperatura mínima (°C) y la RFA incidente acumulada (MJ m⁻²) para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (Filial UofA con símbolos blancos y Eclipse con símbolos grises) en los tres años (2006, 2007 y 2008).</i>	88
Fig. 5.1. <i>Rendimiento en grano en colza-canola relativo (al máximo rendimiento observado con fertilización nitrogenada) en función del nitrógeno disponible (kg ha⁻¹). La línea punteada señala el rendimiento relativo de 95 % considerado para saturación de la respuesta del rendimiento al N disponible. Rendimientos máximos: 3350 kg ha⁻¹ (Dreccer et al., 2000), 3520 y 2650 kg ha⁻¹ en GR-Greenethorpe y CA-Canowindra, respectivamente (Hocking et al., 1997) y 3000 y 2900 kg ha⁻¹ en RA-Rafaela y CP-C.Pellegrini, respectivamente (Gambaudo y Fontanetto, 2008). Las dos localidades de este último trabajo se ajustaron a una única ecuación. Ecuaciones descriptas en el Anexo 5.</i>	99
Fig. 5.2. <i>Contenido de aceite en grano (% en base seca) en función de la temperatura media promedio durante la etapa postfloración (IFl-MF) en colza-canola. Se incluyen los datos de este trabajo (Capítulo 2 en círculos blancos, 20-24 genotipos evaluados en dos años, y Capítulo 4 en círculos negros, 2 genotipos primaverales evaluados en tres años) y regresiones lineales realizadas a partir de los datos observados en Australia por Si y Walton, 2004 (a), Walton et al., 1999 (b) y Robertson y Holland, 2004 (c).</i>	103
Fig. A.2. <i>Fotografías explicativas de la extracción de raíces de los contenedores.</i>	121

DECLARACIÓN

"Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original, producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no ha sido presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución."

María Belén Agosti

ABREVIATURAS UTILIZADAS

Abreviatura	Significado	Abreviatura	Significado
% AC	Contenido de aceite en porcentaje	IFI	Inicio de floración
% PRO	Contenido de proteínas en porcentaje	IFr	Inicio de fructificación
16:0	Ácido palmítico	INV	Invernales
18:0	Ácido esteárico	K	Potasio
18:1	Ácido oleico	MF	Madurez fisiológica
18:2	Ácido linoleico	MO	Materia orgánica del suelo
18:3	Ácido linolénico	N	Nitrógeno
20:0	Ácido araquídico	N₀S₀	Bajos N y S
22:0	Ácido behénico	N₀S₁	Bajo N y alto S
22:1	Ácido Erúcico	N₁S₀	Alto N y bajo S
24:0	Ácido lignocérico	N₁S₁	Altos N y S
ANVA	Análisis de varianza	ND	Dato no disponible
BAT	Biomasa aérea total	NG	Número de granos por superficie
BATc	Biomasa aérea total corregida	NGS	Número de granos por silicua
BFV	Botón floral visible	NS	Número de silicuas
BRP	Biomasa de raíces principales	°Cd	Grado centígrado día
BRS	Biomasa de raíces secundarias	P	Fósforo
BRT	Biomasa de raíces total	PC	Primaverales cortos
BS	Biomasa de silicuas	PCr	Período crítico
BT	Biomasa de tallos	PG	Peso del grano
C	Carbono	PM	Primaverales medios
CA	Cambio de ápice	Q	Cociente fototermal
CV	Coeficiente de variación	R	Roseta
E	Emergencia	RFAinc	Radiación fotosintéticamente activa incidente
EAN	Eficiencia de absorción del nitrógeno	RFAinc Ac	Radiación fotosintéticamente activa incidente acumulada
EAUN	Eficiencia agronómica de uso del nitrógeno	RFAint	Radiación fotosintéticamente activa interceptada
EFUN	Eficiencia fisiológica de uso del nitrógeno	Rto	Rendimiento en grano
Ei	Eficiencia de intercepción	Rto AC	Rendimiento en aceite
EUR	Eficiencia en el uso de la radiación	S	Azufre
EURc	Eficiencia en el uso de la radiación corregida	Sbr	Siembra
GLU	Contenido de glucosinolatos	SAT	Ácidos grasos saturados
GxA	Interacción genotipo x ambiente	Temp Max	Temperatura máxima
IAF	Índice de área foliar	Temp Med	Temperatura media
IC	Índice de cosecha	Temp Min	Temperatura mínima
ICN	Índice de cosecha de nitrógeno	TT	Tiempo térmico
IElg	Inicio de elongación del tallo		

RESUMEN

FERTILIZACIÓN NITRÓGENO-AZUFRA Y VARIABILIDAD GENOTÍPICA EN EL RENDIMIENTO Y LA CALIDAD DE GRANO EN COLZA-CANOLA (*Brassica napus* L.)

La difusión del cultivo de colza-canola en Argentina es aún limitada, siendo los bajos rendimientos en grano a nivel de producción una de las principales causas de la escasa adopción. Esto es consecuencia del desconocimiento de las respuestas a factores del ambiente que determinan el rendimiento y sus componentes, y a la oferta de nutrientes como estrategias para maximizar el rendimiento y la calidad comercial de los granos. Los objetivos del presente trabajo fueron analizar (i) la variabilidad en rendimiento y calidad del grano en un amplio rango de genotipos comerciales de colza-canola de Argentina, (ii) el efecto de la fertilización con nitrógeno y azufre sobre el rendimiento y (iii) la calidad del grano de dos genotipos primaverales; en un total de tres años en el campo experimental del Dto. de Producción Vegetal de FAUBA. Se halló una importante variabilidad en el rendimiento en grano entre genotipos y años, mientras que la calidad resultó más estable ante cambios del ambiente. Tanto el rendimiento como el porcentaje de aceite y ácido linolénico del grano se redujeron con temperaturas medias $>13^{\circ}\text{C}$ durante la etapa de postfloración, resultando éste el factor ambiental preponderante, covariando con la radiación incidente. La fertilización nitrogenada (hasta 280 kg N ha^{-1} aplicados durante todo el ciclo) aumentó el rendimiento en grano, a través de cambios en la biomasa aérea total y el número de granos por unidad de área, sin afectarse la partición a raíz y a grano, la eficiencia de uso de la radiación ni el peso del grano. Las distintas eficiencias de uso del N (agronómica, de absorción y fisiológica) fueron constantes en ambos genotipos, y no se alteraron por la oferta de S. Los niveles de S explorados (de 9 a 69 kg ha^{-1}) no parecieron ser limitantes para generar diferenciales en el rendimiento y la calidad del grano. El porcentaje de aceite se redujo y el de proteínas se incrementó más que proporcionalmente ante aumentos en la disponibilidad de N, mientras que el perfil de ácidos grasos y el contenido de glucosinolatos se mantuvieron estables. Los resultados de esta tesis permiten concluir que bajo las condiciones ambientales evaluadas es posible obtener altos rendimientos y alta calidad de grano de colza-canola con los genotipos disponibles actualmente en el mercado argentino.

Palabras claves: rendimiento, calidad de grano, nitrógeno, azufre, *Brassica napus* L.

ABSTRACT**NITROGEN AND SULFUR FERTILIZATION AND GENOTYPIC VARIABILITY IN GRAIN YIELD AND GRAIN QUALITY IN RAPESEED (*Brassica napus* L.)**

Low grain yield at the production level is the most important reason that determines that rapeseed was not widely adopted in Argentina. This is due to a lack of knowledge on the responses to environmental factors that determine yield and its components, and the supply of nutrients as strategies to maximize grain yield and commercial quality. The objective of this thesis were to analyze (i) the variability in grain yield and quality in a wide range of commercial genotypes of rapeseed in Argentina, (ii) the effects of nitrogen and sulfur fertilization on grain yield and (iii) the grain quality in two spring genotypes. To fulfill those objectives, experiments were carried out during three experimental years in the experimental field of the Dept. of Plant Production FA UBA. An important variation in grain yield among genotypes and years was found, being grain quality a more stable trait in response to changes of the environment. Grain yield, oil percentage, and linolenic acid content decreased with mean temperatures $>13^{\circ}\text{C}$ during the post-flowering period, detecting co variation of this factor with the incident radiation during that period. Nitrogen fertilization (up to 280 kg ha^{-1} applied throughout the crop cycle) increased grain yield through changes in aerial biomass and number of grains per unit area, without affecting harvest index, root partitioning, radiation-use efficiency and grain weight. Nitrogen-use efficiencies (agronomic, absorption and physiological) were constant in both genotypes, and not altered by the supply of S. Sulfur levels explored (9 to 69 kg ha^{-1}) were apparently not limiting to generate differential grain yield and quality. Oil percentage was reduced but grain protein increased, more than proportionately than oil in grain, when N was increased, while the fatty acid profile and glucosinolate content remained stable for different N rates. It was concluded that under the environmental conditions tested it is possible to produce high grain yields and good grain quality with the rapeseed genotypes currently available in Argentina.

Key words: Grain yield, grain quality, nitrogen, sulfur, *Brassica napus* L.

INTRODUCCIÓN GENERAL, OBJETIVOS E HIPÓTESIS

- 1.1. Introducción general
 - 1.1.1. Importancia del cultivo, nivel de producción y usos del grano de colza-canola
- 1.2. Marco conceptual, objetivos e hipótesis
 - 1.2.1. Variabilidad genotípica del rendimiento y la calidad comercial del grano
 - 1.2.2. Generación del rendimiento y sus componentes
 - 1.2.3. Generación de la calidad comercial del grano
- 1.3. Estructura de la tesis

1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1.1. Importancia del cultivo, nivel de producción y usos del grano de colza-canola

El cultivo de colza-canola (*Brassica napus* L.) ocupa el tercer lugar en la producción mundial de oleaginosas, después de la palma y la soja (Oil World, 2010). En la campaña 2008/09, se produjeron en el mundo 57,8 millones de toneladas del cultivo (FAO, 2010), siendo los principales países productores China, Canadá, India, Alemania y Francia, que en conjunto produjeron el 75,5 % del total mundial (promedio de las últimas cinco campañas: 2004 a 2008). En Argentina, no ha ocupado una superficie importante, llegando a sembrarse unas 42000 has en los años 1991 y 2008 (MAGyP, 2010). En cuanto a los rendimientos nacionales, promediando las últimas diez campañas (2000-2009), el mismo fue de 1440 kg ha⁻¹, con una tasa anual de crecimiento de 12 kg ha⁻¹ año⁻¹, muy baja respecto de la lograda en otros cultivos en el país y en colza-canola en otros países (MAGyP, 2010). El rendimiento promedio alcanzado en el país, es similar al logrado en países con una larga historia de producción y donde el cultivo ocupa una superficie mucho mayor, como Australia, Canadá y China, con rendimientos promedios a nivel país de 1200, 1500 y 1600 kg ha⁻¹, respectivamente. No obstante, resultan sensiblemente inferiores a los alcanzados en países como Alemania y Francia, con medias nacionales para este mismo período de 3400 y 3200 kg ha⁻¹, respectivamente (FAO, 2010). Las principales zonas productoras en Argentina se ubican al sur de Buenos Aires y este de La Pampa, aunque las zonas de aptitud agroecológicas para el cultivo en el país son más amplias, incluyendo zonas como Entre Ríos, Santa Fe, Córdoba y Mendoza (Murphy y Pascale, 1990).

El principal uso del grano de colza-canola es la obtención de aceite comestible, pero en los últimos años la producción de biodiesel ha cobrado interés especialmente en ciertos países de Europa. La calidad del grano para consumo alimenticio está definida por el porcentaje de aceite, el contenido de glucosinolatos y el perfil de ácidos grasos, entre ellos el ácido erúico. Los glucosinolatos y el ácido erúico son dos factores anti-nutricionales, que en cantidades elevadas, impiden el consumo de la harina en la alimentación animal y del aceite para consumo humano, respectivamente. Así, un aceite de calidad para consumo humano será aquel que no contenga ácido erúico, que tenga bajo contenido de ácidos grasos saturados y una alta proporción de monoinsaturados, como el ácido oleico (McDonald, 1995). Los ácidos grasos saturados son los que no presentan dobles ligaduras en su cadena e implican un riesgo para la salud humana, porque son precursores de la síntesis de colesterol y aumentan el riesgo de enfermedades coronarias, mientras que los monoinsaturados presentan una única doble ligadura en su cadena (Windauer y Ploschuk, 2006).

1.2. MARCO CONCEPTUAL, OBJETIVOS E HIPÓTESIS

En esta sección se describirá el marco conceptual vinculado a (i) la variabilidad genotípica del rendimiento y la calidad comercial del grano, (ii) la generación del rendimiento y sus componentes y (iii) la generación de la calidad comercial del grano. Asimismo, dentro de cada uno de los puntos indicados anteriormente se plantearán los objetivos e hipótesis propuestas.

1.2.1. Variabilidad genotípica del rendimiento y la calidad comercial del grano

Al igual que en otros cultivos de grano, existe una importante variabilidad genotípica tanto en rendimiento como en calidad en colza-canola (Si y Walton, 2004; Si *et al.*, 2003; Sana *et al.*, 2003; Pritchard *et al.*, 2000; Walton *et al.*, 1999; Shafii *et al.*, 1992). En estos trabajos, hallaron diferencias entre genotipos en la capacidad de producir grano y aceite, aunque el rendimiento siempre fue mucho más variable que la calidad del grano y estuvo fuertemente influenciado por las condiciones ambientales, especialmente durante la etapa post-floración (Si y Walton, 2004). Estos mismos autores, combinando 4-5 genotipos en 3-4 fechas de siembra en 6 localidades australianas, hallaron una correlación positiva entre la duración de la etapa post-floración y el contenido de aceite del grano. Por el contrario, pocos trabajos han analizado la variabilidad genotípica en el contenido de glucosinolatos y perfil de ácidos grasos (Werteker *et al.*, 2010; Pritchard *et al.*, 2000).

En Argentina, existe escasa información sobre el comportamiento en rendimiento y calidad de los distintos genotipos comerciales disponibles, sembrados en un mismo ambiente bajo condiciones comparables. Desde el año 2006, el INTA está llevando adelante una red nacional de evaluación de cultivares de colza-canola, con ensayos en siete localidades del país. Esta es la única información pública disponible que existe localmente, donde se comparan en forma simultánea todos los genotipos comerciales que están disponibles en nuestro país en varios ambientes, incluyendo estimaciones de rendimiento y duración de algunas etapas fenológicas. La información disponible muestra amplios rangos de rendimiento logrado en cada zona, con promedios de entre 800 y 3500 kg ha⁻¹, y coeficientes de variación del rendimiento entre genotipos en general superiores al 15 %, aunque en 2007 algunas localidades tuvieron valores de 8-11 % (Iriarte *et al.*, 2008; 2007; 2006). Sin embargo, en estos ensayos no se analiza la variabilidad genotípica y ambiental dentro y entre zonas y años, y tampoco se analiza la calidad del grano obtenido, especialmente el contenido de aceite, perfil de ácidos grasos y contenido de glucosinolatos.

Entre los antecedentes locales sobre calidad del grano de colza-canola, se encuentran ensayos realizados por la Chacra Experimental Integrada Barrow (INTA-MAA) en Tres Arroyos (Buenos Aires) en 2004, donde se evaluó la variabilidad en el contenido de aceite del grano, comparando ocho genotipos comerciales en cuatro fechas de siembra (*i.e.* entre abril y junio), hallándose valores de contenido de aceite en grano que variaron entre 41 y 47 % (Iriarte, 2004). Si bien, la fuente de variabilidad más grande se halló entre genotipos, también hubo una marcada interacción con el ambiente, con diferentes respuestas a la fecha de siembra según cada material genético. Desde el 2004 al presente se ha ampliado el número de genotipos de colza-canola disponibles en el mercado, contando actualmente con más de 20. Así, resulta necesario analizar con mayor profundidad la variabilidad en el contenido de aceite y su calidad en los genotipos de colza-canola disponibles actualmente en el mercado nacional, evaluándolos en un mismo ambiente durante varios años y analizando las condiciones ambientales exploradas durante su crecimiento.

A nivel internacional, numerosos trabajos analizaron el efecto del ambiente sobre el rendimiento y la calidad en materiales particulares de colza-canola, mostrando una fuerte influencia de las condiciones ambientales en la etapa postfloración (Werteker *et al.*, 2010; Si y Walton, 2004; Pritchard *et al.*, 2000; Walton *et al.*, 1999; Hocking y Stapper, 1993; Ryan, 1979; Canvin, 1965). Especialmente se ha estudiado el efecto de las temperaturas medias y las precipitaciones durante postfloración sobre el rendimiento y el contenido de aceite. Sin embargo, los antecedentes locales que han analizado el

efecto ambiental durante el llenado de granos son muy escasos. En este sentido, Izquierdo *et al.* (2009; 2005) analizaron los efectos de la temperatura y la radiación postfloración sobre la calidad del grano de un genotipo de colza-canola cultivado en Balcarce (Buenos Aires), mostrando que ambos factores ambientales pueden modificar tanto el contenido de aceite como el perfil de ácidos grasos, encontrándose respuestas de igual sentido pero menor magnitud que las de otras especies oleaginosas como girasol y soja. Sin embargo, hasta el momento no se ha evaluado la respuesta de otros parámetros de calidad muy importantes en colza-canola, como son el contenido de glucosinolatos y el porcentaje de ácido erúico, ante variaciones genotípicas y ambientales. Por lo tanto, será de suma utilidad contar con mayor información sobre la variabilidad genotípica y analizar la influencia del ambiente sobre el rendimiento y la calidad del grano en los genotipos comerciales disponibles en Argentina, abarcando todos los parámetros químicos de importancia comercial en el aceite de colza-canola para uso alimenticio. La generación de dicha información ayudará en la adopción de decisiones de manejo adecuadas (genotipo, zona y fecha de siembra) a partir de una base funcional de la fisiología del cultivo, que permita maximizar su rendimiento y calidad.

De esta forma el primer objetivo de la presente tesis es (i) *“evaluar la variabilidad en el rendimiento y la calidad del grano, determinada por el porcentaje de aceite, perfil de ácidos grasos y contenido de glucosinolatos, en casi la totalidad de los genotipos comerciales de colza-canola presentes actualmente en Argentina, analizando su asociación con las condiciones ambientales (i.e. temperatura y radiación) durante el llenado efectivo de los granos”*. En relación a este objetivo se pondrá a prueba la Hipótesis 1: **“la calidad comercial de grano (i.e. contenido de aceite, perfil de ácidos grasos y contenido de glucosinolatos) es variable entre los genotipos comerciales de colza-canola, asociada principalmente a las diferentes condiciones ambientales exploradas durante el llenado de los granos, fundamentalmente temperatura y radiación”**.

1.2.2. Generación del rendimiento y sus componentes

Existen distintas escalas fenológicas para describir el ciclo del cultivo de colza-canola, siendo las más utilizadas son las de Silvester-Bradley y Makepeace (1984) y la escala del CETIOM (Arnoud, 1989). La escala del CETIOM modificada por Gómez y Miralles (2006) señala los principales cambios fenológicos a nivel macroscópico en el cultivo (Figura 1.1), destacándose los períodos de plántula, roseta, elongación del tallo, floración y llenado de los granos.

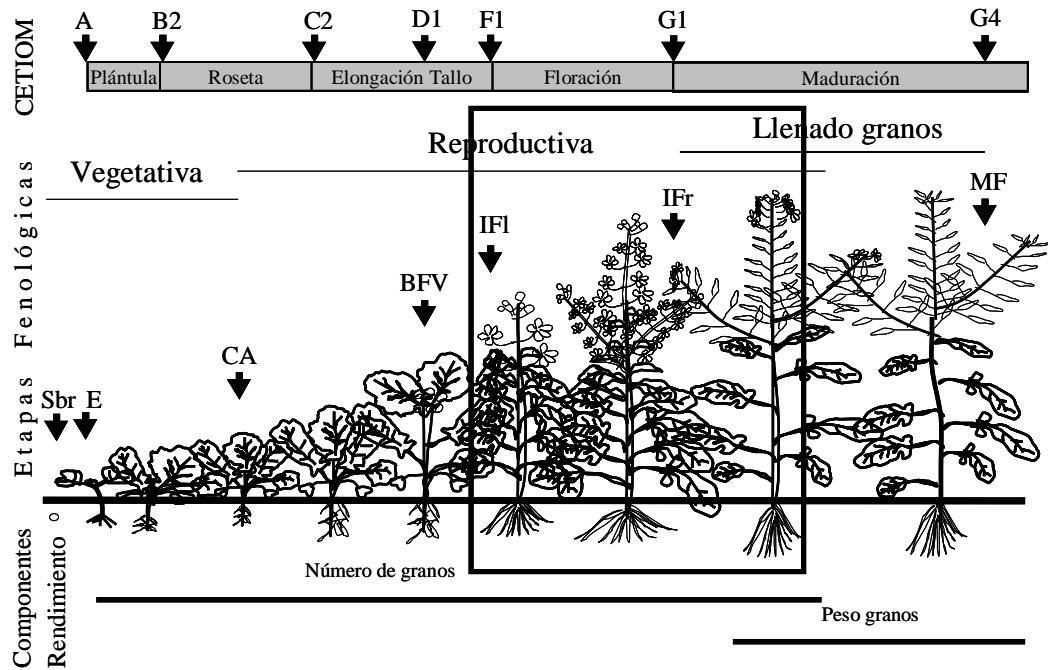


Fig. 1.1. Esquema indicando las distintas etapas ontogénicas de colza-canola y los componentes del rendimiento que se generan a lo largo del desarrollo del cultivo (Sbr) siembra, (E) emergencia, (CA) cambio de ápice, (BFV) botón floral visible, (IFI) inicio de floración, (IFR) inicio de fructificación, (MF) madurez fisiológica. En la parte superior del gráfico se superpuso la escala CETIOM. El recuadro señala la ventana crítica para la definición del rendimiento. Adaptado de Gómez y Miralles (2006).

La duración del ciclo ontogénico de colza-canola varía según el hábito de crecimiento, *i.e.* cultivares de crecimiento primaveral e invernol (Jedel *et al.*, 1986). Los cultivares invernales requieren ser expuestos a una determinada cantidad de horas de frío para florecer, mientras que los tipos primaverales generalmente no requieren de este estímulo. La sensibilidad a este factor varía además entre cultivares (Murphy y Scarth, 1991), e incluso en Argentina se han observado ciertos requerimientos de vernalización en algunos cultivares primaverales (Gómez, 2007). Entre los genotipos disponibles en Argentina existen ambos grupos de hábitos de crecimiento, pero predominan los materiales primaverales. Además de la respuesta a la vernalización, como en otros cultivos, los diferentes genotipos de colza-canola responden de modo universal a la temperatura y al fotoperíodo, cuyas respuestas han sido caracterizadas e introducidas en modelos sencillos de predicción fenológica (*e.g.* CRONOCANOLA ©, Miralles *et al.*, 2009).

La oferta de nitrógeno (N) y azufre (S), si bien puede afectar el desarrollo (Rodríguez *et al.*, 1994; Longnecker *et al.*, 1993), generalmente modifica los atributos de crecimiento del cultivo de colza-canola (Zhao *et al.*, 1993). Para producir una tonelada de grano por hectárea el cultivo necesita absorber 60,2 kg N, 15 kg P (fósforo), 65 kg K (potasio) y 11,7 kg S (IPNI, 2010). Así, el cultivo de colza-canola necesita el doble de nitrógeno que el trigo, y un 35 % más que el girasol. Respecto al azufre, requiere entre un 57 y 61 % más que la mayoría de los cultivos utilizados en nuestro país. Sin embargo, como consecuencia de una menor capacidad de removilizar el N desde las hojas, una importante cantidad del mismo retorna al suelo (*ca.* 15 % del total de N absorbido; Rossato *et al.*, 2001) con las hojas senescentes, quedando disponibles para el siguiente cultivo en la rotación.

Sin bien durante todo el desarrollo fenológico del cultivo se van generando los componentes numéricos y fisiológicos del rendimiento, es posible identificar una ventana crítica (recuadro en Figura 1.1) para la generación del rendimiento donde una disminución de los recursos (radiación, agua y nutrientes) o algún estrés, producirá una importante reducción del rendimiento final del cultivo (Mingeau, 1974). En el caso de colza-canola, este período crítico (PCr) se ubica aproximadamente en las dos semanas (Mendham *et al.*, 1981) o 350 °Cd posteriores al inicio de la floración (Habekotté, 1997b), equivalentes a unos 20-30 días, cuando se define el nivel de aborto de flores y el número de granos por planta. Coincidiendo con esta ventana crítica, ocurre el reemplazo del área foliar por el área de silicuas, ocurriendo un cambio de estructuras fotosintetizantes (Diepenbrock, 2000; Tayo y Morgan, 1975).

Un modelo simple de generación del rendimiento en grano, asume que este es el producto de la biomasa total generada por el cultivo y el índice de cosecha (IC), siendo este el atributo que más limita el rendimiento en colza-canola (Diepenbrock, 2000). A modo de ejemplo, para colzas invernales son citados valores de IC de 25 a 30 % (Habekotté, 1997a; Austin *et al.*, 1980), los cuales son relativamente bajos comparados con otros cultivos como trigo (Diepenbrock, 2000; Habekotté, 1997a). Por lo tanto, futuros incrementos en rendimiento deberían, posiblemente, estar ligados a incrementos en el IC. En cuanto al impacto de la nutrición sobre el IC, se ha estudiado principalmente el efecto del N, aunque no se ha hallado una respuesta significativa en cuanto a cambios en la partición de la biomasa asociada a cambios en la disponibilidad de N (Hocking *et al.*, 1997; Schjoerring *et al.*, 1995; Hocking y Stapper, 1993). De este modo, es posible considerar que los aumentos en el rendimiento asociados a mayores ofertas de N están vinculados con una mayor biomasa producida más que a cambios en su partición.

Distintas evidencias muestran aumentos de rendimiento de colza-canola por agregado de N (Rathke *et al.*, 2005; Cheema *et al.*, 2001; Hocking *et al.*, 1997; Asare y Scarisbrick, 1995; Scott *et al.*, 1973; Allen y Morgan, 1972), y en menor medida por agregado de S (Malhi *et al.*, 2007; Blake-Kalff *et al.*, 2000). La literatura muestra que los rendimientos máximos, en un cultivo sin limitación por agua ni por restricciones bióticas, se han alcanzado con 140 a 200 kg ha⁻¹ de N disponible (Rathke y Scuster, 2001; Sieling y Christen, 1997; Hocking *et al.*, 1997; Zhao *et al.*, 1993) y 10 a 12 kg ha⁻¹ de S (Malhi *et al.*, 2007; Blake-Kalff *et al.*, 2000), con diferencias entre genotipos, años y localidad. Sin embargo, pocos trabajos analizaron estos nutrientes en forma conjunta, a los efectos de abordar la posible interacción entre ambos. En este sentido, Jackson (2000) muestra interacción NxS significativa en colza-canola en dos de cinco localidades del oeste de USA donde se llevaron a cabo los experimentos. Resultados similares fueron encontrados en trigo en la pampa ondulada, donde deficiencias de S redujeron la capacidad de absorción de N (Salvagiotti *et al.*, 2009).

La biomasa total generada por el cultivo se distribuye entre el crecimiento de la raíz y la parte aérea. Algunos trabajos evaluaron la partición a raíz en colza-canola, mostrando que representa entre un 16 % (Tayo y Morgan, 1975) y 19 % (Rossato *et al.*, 2001) de la biomasa total producida por planta. En cuanto a los efectos de la fertilización sobre la partición de biomasa radical, los resultados han sido escasos y contradictorios. Kamh *et al.* (2005) en ensayos a campo observaron que la fertilización con N reduce la partición a biomasa radical, al igual que se ha observado en otros cultivos. Sin embargo, Ogunlela *et al.* (1990) no hallaron cambios en la materia seca radical al agregar 30, 100 o 170 ppm de N, al igual que lo observado por Schulte auf'm Erley *et al.* (2007) al medir biomasa de raíz por planta, pero ambos ensayos son en condiciones controladas con fertilización líquida. En estos trabajos no se analiza el

efecto del S ni la posible interacción N x S. Surge entonces la necesidad de ampliar los conocimientos del efecto de la fertilización con N y S en condiciones a campo sobre el crecimiento radical, debido a que este cultivo posee una raíz pivotante y profunda, que en situaciones de estrés podría competir con el crecimiento aéreo, lo que podría incidir negativamente sobre el rendimiento. Para una mejor comprensión de estos aspectos serán necesarios trabajos que evalúen con mayor detalle el efecto del N sobre la partición a raíz, en sistemas experimentales similares a situaciones a campo.

Teniendo en cuenta los componentes fisiológicos de la biomasa (radiación interceptada - RFAint - y eficiencia en el uso de la radiación - EUR), en colza-canola, al igual que en otros cultivos, la RFAint experimenta las mayores variaciones, a través de cambios en la biomasa por planta, el índice de área foliar (IAF) y la duración del área foliar con diferentes prácticas de manejo, como la densidad (Angadi *et al.*, 2003), la fertilización con N y P (Cheema *et al.*, 2001) y la fecha de siembra (Nanda *et al.*, 1995). El alto contenido de aceite del grano de colza-canola hace que la EUR sea relativamente baja (comparada con granos de cereales) cuando la biomasa producida no se corrige por su valor energético, especialmente durante el llenado de los granos. Habekotté (1997a) utilizando modelos de simulación para comparar colza-canola y trigo, obtuvo valores de EUR en colza-canola significativamente menores a trigo (1,86 vs. 2,52 g MJ⁻¹, p < 0,05), en ambos cultivos determinado en el período postfloración. Se ha estudiado el efecto de la nutrición sobre la generación de biomasa y sus componentes fisiológicos, observándose aumentos significativos del IAF y de la duración del área foliar cuando se fertilizó con 120 kg N ha⁻¹ y 40 kg P ha⁻¹, lo que explicó la mayor producción de materia seca y de rendimiento (Cheema *et al.* 2001). Resultados similares fueron hallados por Scott *et al.* (1973) al pasar de 0 a 300 kg N ha⁻¹, y Allen y Morgan (1972) al comparar dosis de 0, 106 y 211 kg N ha⁻¹. Hansen (1994) encontró aumentos de la eficiencia de uso de la radiación (EUR) al comparar dosis de N de 0 y 240 kg ha⁻¹, al igual que lo hallado por Justes *et al.* (2000), Gosse *et al.* (1983) y Rode *et al.* (1983), aunque en estos dos últimos trabajos hallaron un muy bajo efecto del N. Por el contrario, Leach *et al.* (1989) y Andersen *et al.* (1996) no encontraron relación entre la fertilización con N y la EUR. Esto muestra la necesidad de realizar nuevos estudios que permitan comprender el efecto del N sobre la capacidad fotosintética del cultivo de colza-canola, y el posible efecto de otros nutrientes como el S.

La generación del rendimiento se puede analizar también a través de los componentes numéricos que lo integran. Diepenbrock y Grosse (1995) desglosaron los componentes del rendimiento de colza-canola, identificando al número de plantas m⁻², silicuas planta⁻¹, granos silicua⁻¹ (que en conjunto determinan el número de granos m⁻²) y peso del grano como los componentes primarios. En los trabajos que observaron incrementos del rendimiento por agregado de N, el componente que mejor explicó las diferencias en rendimiento fue el número de granos por unidad de superficie (NG), explicado por aumentos en el número de silicuas planta⁻¹ (Cheema *et al.*, 2001; Hocking *et al.*, 1997; Asare y Scarisbrick, 1995; Scott *et al.*, 1973; Allen y Morgan, 1972). Algunos trabajos también muestran incrementos en el número de granos por silicua (Cheema *et al.*, 2001; Scott *et al.*, 1973; Allen y Morgan, 1972), mientras que otros observaron estabilidad en este parámetro (Hocking *et al.*, 1997; Asare y Scarisbrick, 1995) en respuesta a la aplicación de nitrógeno. En cuanto a los cambios en el peso de los granos (PG), en general los trabajos no muestran cambios significativos por agregado de N (Ogunlela *et al.*, 1990; Hocking y Mason, 1993). Sin embargo, Cheema *et al.* (2001) y Asare y Scarisbrick (1995) muestran aumentos del PG, pero son ensayos donde se evalúan más de un nutriente y además la magnitud de los cambios en el PG son menores a los aumentos en el NG; y por otro lado, Hocking *et al.* (1997) hallaron

caídas significativas del PG en una de dos localidades, pero esto coincidió con deficiencias hídricas durante el llenado. De todas formas, en colza-canola, al igual que en otros cultivos, el NG es el componente más importante en la determinación del rendimiento, siendo el PG mucho más estable ante modificaciones en el ambiente (Peltonen-Sainio y Jauhiainen, 2008; Scarisbrick *et al.*, 1981). Los efectos del S sobre los componentes del rendimiento han sido mucho menos estudiados, observándose en términos generales pocos efectos significativos (Asare y Scarisbrick, 1995), no habiendo trabajos que estudien el efecto conjunto de N y S (y su interacción) sobre los componentes del rendimiento.

Existen distintas ineficiencias en el sistema suelo-planta que hacen que no todo el fertilizante aplicado sea absorbido por la planta. Distintos factores influyen sobre las mismas: (i) la movilidad del nutriente en el suelo, (ii) la demanda del cultivo durante el ciclo, (iii) el momento de aplicación, (iv) la dosis y el fraccionamiento de la fertilización. El nitrógeno y el azufre son elementos solubles en sus formas iónicas de nitratos y sulfatos, lo que los hace móviles en el suelo y que estén fácilmente disponibles para la planta. Durante el ciclo del cultivo de colza-canola se modifica la demanda de nutrientes, alcanzando las mayores tasas de absorción con el inicio de la elongación del tallo (Figura 1.1), cuando la acumulación de materia seca se realiza a su tasa máxima (Rossato *et al.*, 2001). En cuanto al momento de aplicación y fraccionamiento del fertilizante, Malagoli *et al.* (2005) observaron que, en ausencia de déficits hídricos, la absorción de N en colza-canola continúa hasta mitad del llenado de los granos, lo que justificaría el fraccionamiento de las fertilizaciones hasta muy avanzado el ciclo del cultivo en aquellos trabajos de investigación que busquen analizar los efectos de la mayor disponibilidad de nutrientes sobre los mecanismos de generación del rendimiento. Por todo lo expuesto, las fertilizaciones a la siembra del cultivo pueden significar, en algunos casos, una baja eficiencia de utilización del nutriente aplicado, por volatilización/lixiviación del fertilizante en los estadios iniciales, de manera que el mismo no esté disponible al momento de máxima demanda. Es por ello que ensayos en condiciones controladas con fertilización en distintas dosis aplicadas durante todo el ciclo del cultivo, permiten abordar un sistema experimental centrado en la respuesta fisiológica de la planta a la disponibilidad del nutriente, controlando que se cubran las demandas de nutrientes a lo largo de todo el ciclo.

La eficiencia agronómica de uso del nitrógeno ($EAUN = \text{kg grano kg N disponible o N aplicado}^{-1}$) indica la transformación del N disponible (el del suelo + fertilizante) o aplicado (fertilizante) en rendimiento. Esta eficiencia puede ser analizada a través de sus dos componentes: (i) la eficiencia de absorción (EAN), *i.e.* la relación entre el N absorbido y el N disponible/aplicado, y (ii) la eficiencia fisiológica de uso del N (EFUN), que muestra la relación entre el rendimiento y el N absorbido (Giller *et al.*, 2004). Ha sido estudiado el efecto del N sobre la EAUN, hallándose una reducción de la misma al aumentar la disponibilidad de N, tanto en colza-canola (Dreccer *et al.*, 2000; Hocking *et al.*, 1997) como en trigo (Timsina *et al.*, 2001; Doyle y Holford, 1993). En trigo, Salvagiotti *et al.* (2009) han evaluado la interacción NxS sobre estas eficiencias, mostrando aumentos de la EAUN al fertilizar con S, como consecuencia de aumentos de la EAN y sin que se produjeran cambios de importancia en la EFUN. De esta manera, una mayor oferta de S promovería una mayor absorción de N, para similares dosis de N disponible a la siembra del cultivo. Al presente no existen estudios similares que hayan abordado las eficiencias de utilización de nutrientes para la interacción NxS en el cultivo de colza-canola.

A nivel nacional, en un ensayo a campo en la localidad de Venado Tuerto, Rubio *et al.* (2007) no hallaron diferencias en los rendimientos por el agregado de 52 kg N ha^{-1}

y 30 kg S ha⁻¹, en forma independiente, pero si al agregarlos en forma conjunta, sugiriendo una posible interacción entre nutrientes. Tamagno *et al.* (1999), encontraron diferencias significativas en el rendimiento por el agregado de 90 kg N ha⁻¹ cuando este nutriente se fraccionó durante el ciclo, las que fueron explicadas por aumentos del número de silicuas y número de granos por unidad de superficie, sin cambios significativos en el peso de los granos. Las escasas evidencias locales en cuanto a las respuestas en los componentes fisiológicos del rendimiento a la aplicación de N y S, y a la interacción de estos dos macronutrientes, sugieren la necesidad de comprender dicha respuesta para las condiciones ambientales de Argentina y los genotipos usados localmente, y explorar en mayor medida la interacción que puede existir entre ambos nutrientes, siendo este último un aspecto que ha sido muy poco estudiado a nivel mundial en colza-canola.

De esta forma el segundo objetivo de esta tesis de maestría es (ii) “*analizar los cambios generados por la fertilización nitrogenada y azufrada aplicada durante todo el ciclo de cultivo sobre los componentes fisiológicos del rendimiento en grano en colza-canola, analizando sus efectos sobre: (a) los componentes numéricos, i.e. el peso y número de grano, (b) la producción de biomasa aérea, y su partición de biomasa a raíz y a grano (IC), así como sus componentes fisiológicos (RFAint y EUR), y (c) las eficiencias de uso del nitrógeno (EAUN, EFUN y EAN) ante distintas ofertas de S*”. En relación a este objetivo se pondrán a prueba las siguientes hipótesis: Hipótesis 2- “**el rendimiento en grano es afectado por el agregado de N y S, en situaciones de deficiencia de estos nutrientes, a través de cambios en la biomasa generada sin cambios significativos en el IC. Desde el punto de vista de los componentes numéricos, el componente de mayor respuesta al agregado de nutrientes será el número de granos por unidad de superficie, no afectándose el peso de los mismos**”; e Hipótesis 3- “**la respuesta del rendimiento al N es mayor cuando la aplicación se acompaña con S debido a una interacción positiva entre ambos nutrientes**”.

1.2.3. Generación de la calidad comercial del grano

La calidad comercial del grano de colza-canola como oleaginosa alimenticia está definida según las normas de comercialización del país (Norma VII SAGPyA, 1994), e incluyen el contenido de (i) aceite (>43 %), (ii) ácido erúico (<2 %), y (iii) glucosinolatos (<20 μ moles g⁻¹). Es decir, que el mercado bonifica, penaliza o rechaza según la calidad del grano que se recibe. Por lo tanto, es de relevancia agronómica y económica estudiar cómo el ambiente y el manejo modifican la calidad, y cual es la variabilidad genética presente en los materiales comerciales disponibles en el país, conducidos bajo distintas condiciones ambientales.

El contenido de aceite del grano maduro de colza-canola puede alcanzar 50-52 % del peso seco del grano. Sin embargo, este valor frecuentemente resulta menor en condiciones de producción, variando de acuerdo al genotipo, las condiciones ambientales durante el llenado de los granos y algunas prácticas de manejo como la fecha y densidad de siembra y el nivel de fertilización. Efectos ambientales como las altas temperaturas (> 28 °C) o heladas intensas post-floración pueden interrumpir el período de llenado y la acumulación de aceite en el grano (Aksouh-Harradj *et al.*, 2006; Aksouh *et al.*, 2001). La disponibilidad de nutrientes también afecta el contenido porcentual de aceite del grano. Distintos trabajos de la literatura muestran reducciones del porcentaje de aceite por agregado de N (Rathke *et al.*, 2005; Hocking *et al.*, 1997; Asare y Scarisbrick, 1995; Holmes y Ainsley, 1977), tanto en colza-canola como en otros cultivos oleaginosos (Triboi y Triboi-Blondel, 2002). Este efecto del N sobre el

porcentaje de aceite se ha asociado al aumento del contenido de proteínas en el grano, es decir debido a un efecto indirecto de la mayor fuente nitrogenada por grano. Sin embargo, no han sido analizados en detalle otros posibles efectos del N disponible para el cultivo sobre la generación de un mayor número de granos y una mayor cantidad de fotoasimilados, que podrían afectar en diferentes sentidos al porcentaje de aceite y de proteína en el grano maduro. Contrariamente, la respuesta del porcentaje de aceite en grano debido al agregado de S no es tan clara, ya que algunos trabajos muestran aumentos del contenido de aceite con el agregado de 10 kg S ha⁻¹ a la siembra (Malhi *et al.*, 2007), mientras que otros no encuentran respuesta con fertilizaciones de hasta 80 kg S ha⁻¹ al comienzo de la etapa de máximo crecimiento de las plantas (Asare y Scarisbrick, 1995). Si bien hay evidencias de los efectos individuales de estos nutrientes sobre la calidad, no existen trabajos en la literatura donde se analice la interacción NxS sobre el contenido de aceite en colza-canola.

El perfil de ácidos grasos también se define durante el llenado de los granos, aunque aquellos trabajos que describen la evolución en el tiempo del perfil de ácidos grasos del grano de colza-canola señalan que los cambios más importantes en la composición ácida ocurren al inicio del llenado, a pesar que la acumulación de aceite continúa hasta cerca de madurez fisiológica del grano (Diepenbrock y Geisler, 1979; Rakow y McGregor, 1975; Fowler y Downey, 1970; Thies, 1970). En líneas generales, sabemos que a medida que avanza el llenado de los granos, el porcentaje de ácido oleico (18:1) aumenta, mientras que el contenido de linoleico (18:2), linolénico (18:3) y de los principales ácidos grasos saturados (palmítico y esteárico, 16:0 y 18:0, respectivamente) se reduce, aunque hasta el momento no contamos con descripciones de este tipo para los genotipos comerciales disponibles en Argentina.

El perfil de ácidos grasos del grano presenta una fuerte influencia tanto del genotipo como del ambiente. En cuanto al efecto del ambiente, los factores más estudiados, que han mostrado afectar la calidad son la temperatura, el agua y la radiación. Tanto en colza-canola (Baux *et al.*, 2008; Aksouh-Harradj *et al.*, 2006; Triboui-Blondel y Renard, 1999; Trémolières *et al.*, 1982) como en otras oleaginosas, bajas temperaturas durante el llenado aumentan el contenido de ácidos grasos poliinsaturados (18:3 en colza-canola y 18:2 en girasol), a expensas del 18:1. Merrien (2005) en colza-canola e Izquierdo *et al.* (2002) en girasol, hallaron relaciones negativas entre las temperaturas mínimas nocturnas durante el llenado y el contenido final de 18:3 (colza-canola) o 18:2 (girasol). Baux *et al.* (2008) obtuvieron mayores contenidos de 18:3 con mayor cantidad de días con temperaturas mínimas por debajo de 13 °C, en un genotipo con bajo contenido de 18:3 (menos de 3,5 %). En cuanto al efecto del agua, se concluyó que un estrés hídrico del 50 % de la evapotranspiración del control sin estrés, favorece la acumulación de 18:3 en detrimento del 18:1 (Triboui-Blondel y Renard, 1999). El efecto de la radiación sobre el perfil ácido es menos claro. Triboui-Blondel y Renard (1999) observaron que muy bajas niveles radiación (reducción del 90 % de la intensidad) en colza-canola aumentaron el contenido de 18:2 y redujeron el de 18:1 en girasol, mientras que casi no afectaron el perfil de ácidos grasos. Por el contrario, Izquierdo *et al.* (2005) hallaron para colza-canola una caída del 18:1 con bajos niveles de radiación (50 y 80 %), al igual que en girasol. Así, los antecedentes sobre las modificaciones del perfil de ácidos grasos ante factores del ambiente son variables y requieren mayor estudio.

El impacto de los nutrientes sobre el perfil de ácidos grasos ha sido poco estudiado. Un trabajo realizado por Behrens (2002), muestra una reducción del 18:1 y aumentos de 18:2, 18:3 y 22:1 por el agregado de N, promovió un aceite más poliinsaturado y con menor estabilidad oxidativa, es decir de menor calidad para

consumo humano. Gao *et al.* (2010) hallaron aumentos del contenido de ácidos grasos saturados y reducciones de la relación 18:1/18:2+18:3 al pasar de 84 a 168 kg N ha⁻¹. Pero por el contrario, Ibrahim *et al.* (1989) no hallaron efecto del N sobre el perfil de ácidos grasos al agregar 71, 142 y 213 kg N ha⁻¹ en dos años experimentales, pero tampoco se redujo el contenido de aceite del grano y no se informa el nivel inicial de N en el suelo, por lo que el cultivo pudo no estar limitado por N en ningún tratamiento. En otras especies del género *Brassica* distintas de *B. napus* se han descripto modificaciones del perfil de ácidos grasos frente a cambios en los contenidos de zinc y S (Munshi *et al.*, 1990) o frente a cambios en el N y S (Joshi *et al.*, 1998). En este último trabajo, realizado en *Brassica juncea*, hallaron máximos valores de 18:2 con 60 kg ha⁻¹ de N y 40 kg ha⁻¹ de S; y un mayor contenido de ácidos grasos saturados y 22:1 en los tratamientos sin fertilizar. Debido a la falta de evidencias de los efectos combinados de N y S sobre la calidad en *Brassica napus*, surge la necesidad de realizar estudios en esta especie para poder aseverar si existe o no efecto de la disponibilidad de nutrientes sobre el perfil ácido en los genotipos de colza-canola disponibles actualmente en el mercado argentino. Esta información resulta esencial para tomar decisiones sobre el nivel de fertilización en este cultivo, dado que excesivos contenidos de 22:1 en el aceite impedirían su uso como aceite comestible.

Otro parámetro de importancia vinculado a la calidad comercial e industrial es el contenido de glucosinolatos en el grano, ya que su presencia en cantidades excesivas reduce la palatabilidad de la harina (subproducto de la molienda del grano usado en alimentación animal) y produce desórdenes nutricionales en el ganado (Vermorel *et al.*, 1986). Debido a que el S es un componente importante de los glucosinolatos, la disponibilidad de este nutriente y el genotipo son los principales factores que modifican su contenido. Existen evidencias que muestran que el contenido de glucosinolatos, en algunas especies del género *Brassica*, aumenta por el agregado de S (Malhi *et al.*, 2007; Fismes *et al.*, 2000). Fismes *et al.* (2000) en ensayos con *Brassica napus*, observaron valores de entre 8 y 18 $\mu\text{moles g}^{-1}$, con distintos niveles de N y S, aunque nunca superaron el máximo permitido para la comercialización (20 $\mu\text{moles g}^{-1}$). Los mismos autores hallaron una importante asociación negativa entre la relación N:S absorbidos a madurez en toda la planta y el contenido de glucosinolatos, con lo cual el efecto de la fertilización azufrada sobre la calidad podría ser contrabalanceado por la fertilización nitrogenada. Estas evidencias sugieren que el balance entre ambos nutrientes podría ser importante en el control del contenido de glucosinolatos, y señala la conveniencia de estudiar su interacción.

De este modo, el tercer objetivo de esta tesis es (iii) “*analizar el efecto del nitrógeno y el azufre, y su relación con el ambiente explorado, sobre la calidad final del grano de dos genotipos de colza-canola, cuantificando el porcentaje de aceite y proteínas, el perfil de ácidos grasos y los glucosinolatos del grano*”. En relación a este objetivo se pondrán a prueba las siguientes hipótesis: Hipótesis 4- **“una mayor oferta de N reduce el porcentaje de aceite del grano, al aumentar la cantidad de estructuras reproductivas (destinos), lo cual disminuye la cantidad de fotoasimilados disponibles por grano para la síntesis de aceite”**, e Hipótesis 5- **“la disponibilidad de S aumenta el contenido de glucosinolatos en el grano, pero es contrabalanceada por un aumento en la cantidad de N disponible”**.

A modo de resumen y para facilitar la lectura se detallan a continuación los objetivos e hipótesis vinculadas a cada uno de dichos objetivos:

Objetivo (i) “*evaluar la variabilidad en el rendimiento y la calidad del grano, determinada por el porcentaje de aceite, perfil de ácidos grasos y contenido de*

glucosinolatos, en casi la totalidad de los genotipos comerciales de colza-canola presentes actualmente en Argentina, analizando su asociación con las condiciones ambientales (i.e. temperatura y radiación) durante el llenado efectivo de los granos”

Hipótesis 1- *“la calidad comercial de grano (i.e. contenido de aceite, perfil de ácidos grasos y contenido de glucosinolatos) es variable entre los genotipos comerciales de colza-canola, asociada principalmente a las diferentes condiciones ambientales exploradas durante el llenado de los granos, fundamentalmente temperatura y radiación”*

Objetivo (ii) *“analizar los cambios generados por la fertilización nitrogenada y azufrada aplicada durante todo el ciclo de cultivo sobre los componentes fisiológicos del rendimiento en grano en colza-canola, analizando sus efectos sobre: (a) los componentes numéricos, i.e. el peso y número de grano, (b) la producción de biomasa aérea, y su partición de biomasa a raíz y a grano (IC), así como sus componentes fisiológicos (RFAint y EUR), y (c) las eficiencias de uso del nitrógeno (EAUN, EFUN y EAN) ante distintas ofertas de S”*

Hipótesis 2- *“el rendimiento en grano es afectado por el agregado de N y S, en situaciones de deficiencia de estos nutrientes, a través de cambios en la biomasa generada sin cambios significativos en el IC. Desde el punto de vista de los componentes numéricos, el componente de mayor respuesta al agregado de nutrientes será el número de granos por unidad de superficie, no afectándose el peso de los mismos”*

Hipótesis 3- *“la respuesta del rendimiento al N es mayor cuando la aplicación se acompaña con S debido a una interacción positiva entre ambos nutrientes”*

Objetivo (iii) *“analizar el efecto del nitrógeno y el azufre, y su relación con el ambiente explorado, sobre la calidad final del grano de dos genotipos de colza-canola, cuantificando el porcentaje de aceite y proteínas, el perfil de ácidos grasos y los glucosinolatos del grano”*

Hipótesis 4- *“una mayor oferta de N reduce el porcentaje de aceite del grano, al aumentar la cantidad de estructuras reproductivas (destinos), lo cual disminuye la cantidad de fotoasimilados disponibles por grano para la síntesis de aceite”*

Hipótesis 5- *“la disponibilidad de S aumenta el contenido de glucosinolatos en el grano, pero es contrabalanceada por un aumento en la cantidad de N disponible”*

1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS

La presente tesis se estructura en cinco capítulos donde se abordarán distintos aspectos ecofisiológicos relacionados con la variabilidad en rendimiento y calidad de colza-canola, analizando por un lado (i) el comportamiento de genotipos comerciales disponibles en Argentina (Capítulo 2), y por el otro, (ii) los efectos de la fertilización nitrógeno-azufrada aplicada durante todo el ciclo sobre el rendimiento y la calidad del grano en dos genotipos de colza-canola (Capítulos 3 y 4).

En el Capítulo 1 se realizó una descripción general de la importancia del cultivo a nivel mundial y nacional, se introdujo a la temática a abordar a través de un breve marco conceptual y se definieron los objetivos que se abordarán y las hipótesis que se pondrán a prueba.

Finalmente, en el Capítulo 5 se realizará una discusión general de los hallazgos originales y relevantes de la tesis, se llevará a cabo la validación/rechazo de las hipótesis y se presentarán las conclusiones generales de la tesis.

VARIABILIDAD EN EL RENDIMIENTO Y LA CALIDAD COMERCIAL DE
GRANO EN DISTINTOS GENOTIPOS DE COLZA-CANOLA

2.1. Introducción

2.2. Materiales y Métodos

2.2.1. Descripción de los experimentos

2.2.2. Mediciones

Fenología

Rendimiento y calidad comercial del grano

2.2.3. Análisis estadísticos

2.3. Resultados

2.3.1. Variabilidad en la fenología y el rendimiento

2.3.2. Variabilidad en la calidad comercial del grano

2.3.3. Análisis de las condiciones ambientales durante el PCr y el llenado de
granos

2.4. Discusión

2.5. Conclusiones

2.1. INTRODUCCIÓN

El rendimiento y la calidad de grano de colza-canola han mostrado estar bajo influencia del genotipo y el ambiente, en la diversidad de ambientes en los cuales se cultiva (Si y Walton, 2004; Shaffi *et al.*, 1992). En general, los trabajos evalúan la variabilidad en la calidad a través del porcentaje de aceite, pero existen algunos antecedentes donde también analizan otros parámetros que definen la calidad del grano, como el contenido de proteínas (Si *et al.*, 2003; Pritchard *et al.*, 2000), de glucosinolatos (Pritchard *et al.*, 2000) y de ácidos grasos (Werteker *et al.*, 2010; Pritchard *et al.*, 2000) entre genotipos y/o ambientes.

La temperatura media y las precipitaciones en post-floración, han sido los factores ambientales que tuvieron mayor influencia sobre el rendimiento y la calidad del grano. Cuando el llenado de los granos ocurre a bajas temperaturas medias (en el rango de 12 a 18 °C), se obtiene un mayor rendimiento y porcentaje de aceite en el grano (Si y Walton, 2004; Walton *et al.*, 1999), promoviendo una mayor cantidad de ácidos grasos poliinsaturados (Werteker *et al.*, 2010; Pritchard *et al.*, 2000). La caída del aceite por aumento de la temperatura media en general se ha descrito con un modelo lineal (Si y Walton, 2004; Walton *et al.*, 1999), aunque otros trabajos proponen una respuesta bi-lineal con caídas por arriba de 14 °C (Robertson y Holland, 2004). Bajo condiciones controladas en invernáculo y cámaras de crecimiento, se han cuantificado las mismas respuestas del rendimiento y la calidad del grano a la temperatura (Trémolières *et al.*, 1978; Canvin, 1965), así como también el efecto negativo de temperaturas supra-óptimas (temperaturas máximas mayores a 28 °C) en colza-canola (Aksouh-Harradj *et al.*, 2006; Aksouh *et al.*, 2001). Un mayor nivel de precipitaciones durante post-floración, se ha asociado positivamente con el rendimiento y el contenido de aceite del grano (Si y Walton, 2004; Walton *et al.*, 1999). Resulta fundamental comprender el efecto de las condiciones ambientales, y sus interacciones observadas en condiciones a campo para el rango de ambientes y genotipos locales, a fin de optimizar el rendimiento y la calidad del grano.

El efecto de la radiación sobre la calidad del grano ha sido poco estudiado, pero existen antecedentes que muestran un efecto positivo de la cantidad de radiación interceptada por el cultivo durante la etapa postfloración sobre el contenido de aceite y el perfil de ácidos grasos en colza-canola (Izquierdo *et al.*, 2009). Este posible efecto de la radiación, junto con el ya descrito efecto térmico, hacen suponer que en el cultivo de colza-canola también podría utilizarse el coeficiente fototermal (Q) para explicar los cambios en rendimiento, al igual que ocurre en trigo (Magrin *et al.*, 1993; Fischer, 1985), cebada (Arisnabarreta y Miralles, 2008), arveja (Poggio *et al.*, 2005) y girasol (Cantagallo *et al.*, 1997). En el cultivo de colza-canola, no hay evidencias que muestren la vinculación entre el rendimiento y el Q, por lo tanto será importante establecer la relevancia de este coeficiente para este cultivo.

En Argentina, a pesar de la escasa expansión del cultivo, existen numerosos genotipos comerciales de colza-canola (más de 20 actualmente disponibles en el mercado), de ciclo primaveral e invernal, y relativamente poca información sobre el comportamiento en rendimiento y calidad de los mismos cuando se siembran simultáneamente, en comparación con otros cultivos donde esta información está ampliamente difundida. En trabajos realizados por el INTA, se evaluó la variabilidad en el rendimiento (Iriarte *et al.*, 2008; 2007; 2006), y en menor medida en el contenido de aceite del grano (Iriarte, 2004). Actualmente se dispone de un software amigable, denominado Cronocanola© (Miralles *et al.*, 2009), que predice los principales eventos de la fenología del cultivo para 20 genotipos disponibles en el mercado local evaluados

en diferentes fechas de siembra en Buenos Aires. La predicción de la ubicación de etapas pre y postfloración, junto con el análisis de las condiciones ambientales en dichas etapas, permitiría evaluar el comportamiento de los genotipos disponibles a nivel local y su variabilidad en rendimiento y calidad de grano.

El objetivo de este capítulo es analizar comparativamente la fenología, el rendimiento y la calidad comercial de grano lograda en un amplio número de genotipos comerciales invernales y primaverales de colza-canola de Argentina cultivados durante dos años consecutivos en una misma localidad, evaluando la dependencia de las condiciones ambientales (*i.e.* temperatura y radiación) durante la etapa de postfloración y el período crítico de determinación del rendimiento.

2.2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.2.1. Descripción de los experimentos

Durante dos campañas consecutivas (años 2007 y 2008) se realizó un ensayo en el campo experimental del Departamento de Producción Vegetal, Universidad de Buenos Aires (34° 35' S, 58° 29' O), incluyendo 20 (2007) y 24 (2008) genotipos comerciales de colza-canola disponibles en el mercado argentino provenientes de distintos semilleros (Advanta, Bioproductos, Don Atilio, High Tech, Nufarm y Sursem), utilizando tanto variedades como híbridos, de hábitos de crecimiento invernal y primaveral (Tabla 2.1). La semilla para la siembra de los ensayos fue provista en ambos años por los respectivos semilleros. Los genotipos se clasificaron en tres grupos (primaverales cortos: PC, primaverales medios: PM e invernales: INV) de acuerdo a la duración total de sus ciclos (tiempo térmico entre emergencia-madurez fisiológica) estimado utilizando el modelo de predicción fenológica Cronocanola © (Miralles *et al.*, 2009). En el 2008 se incorporaron al análisis, además de los 20 genotipos del año 2007, otros 4 nuevos: un híbrido (SW5262 de Sursem) y tres variedades (*Pacha* y *CMS* de Don Atilio, y *SW370* de Sursem), los cuales no fueron evaluados dentro del modelo Cronocanola ©, y por lo tanto no pudieron ser clasificados *a priori* por la duración total de su ciclo. Por este motivo, su inclusión en los ensayos del 2008 permitió una comparación en simultáneo con el resto de los genotipos comerciales y una posterior clasificación según el largo de su ciclo.

Tabla 2.1. Materiales comerciales de colza-canola incluidos en el análisis de la variabilidad del rendimiento y la calidad comercial del grano en Buenos Aires en dos años de ensayo. Filas grises corresponden a genotipos de ciclo primaveral corto, filas blancas a los de ciclo primaveral medio y filas negras a los de ciclo invernal, clasificados según el modelo de predicción fenológica CRONOCANOLA ©.

	Material	Empresa	Genotipo	Ciclo
1	Filial Precoz	Bioproductos	Variedad	Primaveral Corto
2	Rivette	Nufarm	Variedad	Primaveral Corto
3	Hyola 61	Advanta	Híbrido	Primaveral Corto
4	Hyola 432	Advanta	Híbrido	Primaveral Corto
5	Bio Aureo 2486	Nufarm	Variedad	Primaveral Corto
6	SRM 2836	Sursem	Variedad	Primaveral Medio
7	Legacy	Don Atilio	Variedad	Primaveral Medio
8	Impact	Don Atilio	Variedad	Primaveral Medio
9	Foremost	High Tech	Variedad	Primaveral Medio
10	Eclipse	Sursem	Híbrido	Primaveral Medio
11	SW 2797	Sursem	Híbrido	Primaveral Medio
12	Gladiator	High Tech	Variedad	Primaveral Medio
13	Filial UofA	Bioproductos	Variedad	Primaveral Medio
14	Biolza 440	Bioproductos	Variedad	Primaveral Medio
15	BioAureo 2386	Nufarm	Variedad	Primaveral Medio
16	Jura	Don Atilio	Híbrido	Primaveral Medio
17	SW Gospel	Sursem	Variedad	Invernal
18	Pulsar	High Tech	Híbrido	Invernal
19	Barrel	High Tech	Variedad	Invernal
20	Teddy	High Tech	Variedad	Invernal

La fecha de siembra fue igual para todos los genotipos en cada año: 19 de mayo (2007) y 17 de abril (2008). De cada genotipo, en cada parcela experimental, se sembraron manualmente tres surcos distanciados a 0,175 m y de 1,2 m de largo, con una densidad de siembra objetivo de 100 plantas m⁻². Para lograr esta densidad, el cultivo fue raleado cuando las plántulas tenían 2-3 hojas verdaderas. El diseño utilizado fue en bloques completamente aleatorizados (DBCA) con tres repeticiones. Los extremos de cada bloque fueron sembrados con tres surcos de bordura. Los ensayos fueron conducidos en condiciones potenciales, sin limitaciones hídricas ni nutricionales y protegidos de plagas, malezas y enfermedades. Para ello se aplicaron riegos complementarios, y las malezas se combatieron manualmente en la etapa previa a roseta. Plagas y enfermedades, principalmente pulgón ceniciento (*Brevicoryne brassicae*), polilla de las coles (*Plutella xylostella*), y enfermedades foliares como la mancha gris de la hoja (*Alternaria brassicae*) y pie negro o necrosis de cuello (*Phoma lingam*) se controlaron químicamente.

Para evitar déficit nutricionales se ajustaron los niveles de nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S) a los requerimientos del cultivo definidos por IPNI (2010) para un rendimiento esperado de 3000 kg ha⁻¹. La disponibilidad inicial de estos nutrientes en el suelo (Argiudol vértico) del campo experimental fue de 11-19, 75-47 y 5,6-5,2 kg de N, P y S ha⁻¹ en 2007 y 2008, respectivamente (Tabla 2.2). En función de estos resultados se fertilizó luego del raleo, con urea y sulfato de calcio (yeso agrícola) para elevar los contenidos de N y S en el suelo a 200 y 30 kg ha⁻¹ de N y S, de manera de satisfacer las necesidades del cultivo. En cuanto a la fertilización fosforada, la misma no fue necesaria por los altos niveles de este nutriente en el suelo en ambos años.

Tabla 2.2. Análisis del suelo a la siembra (0-20cm de profundidad) de los ensayos de genotipos comerciales de colza-canola en los años 2007 y 2008. Análisis realizados en el INGEIS (Instituto de Geocronología y Geología Isotópica, UBA-CONICET).

Análisis	Unidad	Método	2007	2008
pH		Agua 1:2,5	ND	5,8
Materia Orgánica	g/kg	Walkley y Black	ND	25,0
Carbono	g/kg	Walkley y Black	ND	14,5
Fósforo Asimilable	ppm	Bray y Kurtz	30,1	18,6
Nitratos	mg/kg o ppm	CuSO ₄ SNEDD	19,4	34,0
Nitrógeno Total	g/kg	Kejdhal	1,59	1,30
Sulfatos	mg/kg o ppm	Sol. Morgan	7,0	6,5

ND: Datos no disponibles

2.2.2. Mediciones

Fenología

Durante el ciclo del cultivo se registró la fenología de cada genotipo y en ambos años, de acuerdo a la escala del CETIOM modificada por Gómez y Miralles (2006), identificando la ocurrencia de la emergencia (E), inicio de floración (IFl) y madurez fisiológica (MF), con el fin de dividir el ciclo de cada genotipo en las etapas de pre y postfloración (E-IFl e IFl-MF, respectivamente). Los datos de ocurrencia de MF para los genotipos utilizados, que surgieron de la caracterización de la dinámica del peso seco del grano de cada genotipo en cada año, fueron provistos por los autores de dos trabajos de intensificación para optar por el grado de Ingeniero Agrónomo de la Universidad de Buenos Aires (Karamanukian, 2010; Ayerza, 2009). Para cada genotipo y año se estimó el momento de ocurrencia del período crítico (PCr), asumiendo al mismo como 0-350 °Cd desde inicio de floración (Habekotté, 1997b).

Para calcular la duración en tiempo térmico (TT, °Cd) de las etapas pre y postfloración, se registraron las temperaturas mínimas y máximas del aire (°C), adoptando una temperatura base de 0 °C (Mendham y Salisbury, 1995). Se calculó la radiación fotosintéticamente activa incidente (RFAinc) a partir de registros meteorológicos de radiación solar incidente en MJ m⁻² (RFAinc = radiación solar incidente x 0,48; Szeicz, 1974) en ambas etapas fenológicas. La información meteorológica fue obtenida de una estación situada a 20 metros del ensayo (Weather Monitor II, Davis, CA). El detalle de las condiciones climáticas de cada año puede encontrarse en la Figura 2.6. Por último, se estimó la RFAinc promedio diaria (MJ RFAinc m⁻² día⁻¹) y la temperatura media promedio (°C) durante el PCr, y se relacionaron ambas variables para calcular el coeficiente fototermal en MJ m⁻² día⁻¹ °C⁻¹ (Q= RFAinc diaria promedio / (Temp. Media promedio - Temp. Base)). Para calcular el Q, también se utilizó una temperatura base de 0 °C (Mendham y Salisbury, 1995).

Rendimiento y calidad comercial del grano

A madurez de cosecha del cultivo, determinada visualmente por el cambio a color marrón de silicuas y tallos, se cosechó un metro del surco central de cada parcela y el material se secó en estufa a 60 °C hasta constancia de peso. Se determinó el rendimiento en grano (kg ha⁻¹) y la calidad comercial del mismo. El contenido de aceite del grano se midió en forma no destructiva mediante NMR (Resonancia Magnética Nuclear), y se expresó en base seca (0 % de humedad de grano) de acuerdo a lo definido en las bases de comercialización. El perfil de ácidos grasos se determinó por cromatografía de gases según la Norma ISO 5508/78 y 5509/78, identificándose un total

de 14 ácidos grasos. En los resultados se muestran valores agrupados de los ácidos grasos saturados (SAT) que incluyen al ácido palmítico (16:0), esteárico (18:0), araquídico (20:0), behénico (22:0) y lignocérico (24:0), junto con los principales ácidos insaturados oleico (18:1), linoleico (18:2), linolénico (18:3) y erúcico (22:1). Por último, el contenido de glucosinolatos en el grano se determinó por cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC), según la Norma ISO/9167-1/92. A través de esta metodología, se determinó la cantidad de compuestos azufrados comprendidos en la fracción glucosídica del grano de colza-canola, expresados en micromoles gramo⁻¹ de grano con base 8,5 % de humedad. Todas las determinaciones de calidad del grano fueron realizadas mediante macro-análisis en los laboratorios de la Cámara Arbitral de Cereales de Bahía Blanca. Debido a la escasa cantidad de grano cosechado en el año 2007, insuficiente para estos análisis (50-70 gramos) en cada repetición, se obtuvo una muestra compuesta de cada material uniendo las tres repeticiones, y luego se extrajeron dos sub-muestras (pseudoréplicas) para su análisis. En el 2008, en cambio, la cantidad de grano cosechado permitió conservar la individualidad de las repeticiones (n= 3) en los análisis.

2.2.3. Análisis estadísticos

La variabilidad del rendimiento y la calidad comercial se analizaron mediante estadística descriptiva utilizando medidas de posición y de tendencia central (media, cuartiles, rango, coeficiente de variación) y se realizaron diagramas de caja y bigote para distintos grupos de genotipos (PC, PM e INV). Para analizar la significancia de las diferencias de los distintos atributos de rendimiento y calidad de los genotipos comerciales dentro de un mismo año se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis (Conover, 1999), debido a la falta de homogeneidad de varianzas, que fue probada incluso realizando transformaciones de los datos (raíz cuadrada y logaritmo). Cuando se detectó un efecto significativo del genotipo ($p < 0,05$), se compararon los rangos estimados por esta prueba ($\alpha = 0,05$), de manera que las conclusiones abordadas corresponden a los rangos (y no sobre las medias de cada atributo). En el año 2007, los atributos de calidad (% de aceite, glucosinolatos y perfil de ácidos grasos) no fueron incluidos en el análisis estadístico debido a la falta de repeticiones verdaderas. En el texto se muestran valores promedios ± 1 error estándar.

Se aplicó un análisis de regresión lineal simple a las relaciones entre las variables analizadas en ambos años (rendimiento en grano, el contenido de aceite, la duración total del ciclo: E-MF, de la etapa prefloración: E-IFl y postfloración: IFl-MF, medidos en días y tiempo térmico). También se relacionó el rendimiento en grano con a) la temperatura media, b) los residuales de la relación entre la temperatura media y la RFAinc diaria, y c) el Q, todos durante el PCr (0-350 °Cd). Los distintos atributos de rendimiento y calidad del grano (contenido de aceite, rendimiento en aceite, contenido de glucosinolatos, ácidos grasos saturados, oleico, linoleico, linolénico y erúcico) se correlacionaron entre sí y con las condiciones ambientales durante la etapa de postfloración (*i.e.* temperatura mínima, media y máxima y RFAinc acumulada) y en el texto se informa el coeficiente de correlación (r) de Pearson. El contenido de aceite y glucosinolatos se asociaron con la temperatura media durante el llenado mediante un modelo bi-lineal utilizando el modelo *Segmental Lineal Regression* de GraphPad Prism versión 5.00 (San Diego, CA).

2.3. RESULTADOS

2.3.1. Variabilidad en la fenología y el rendimiento

Para clasificar de acuerdo a su fenología a los cuatro nuevos genotipos incorporados en el año 2008, se comparó la duración total del ciclo (en días) con las duraciones medias halladas dentro de cada grupo de genotipos (PC, PM e INV) en ese mismo año. El material SW5262 mostró un ciclo similar al resto de los primaverales cortos y estuvo comprendido dentro del rango mínimo y máximo de este grupo (*i.e.* 151 a 175 días de E-MF). Los cultivares *Pacha* y *CMS* fueron más parecidos a los primaverales medios y también tuvieron duraciones dentro del rango de este grupo (*i.e.* 167 a 194 días de E-MF). Por último, SW370 manifestó una mayor duración de su ciclo total, más semejante a los genotipos de ciclo invernal, aunque con una duración que se halló levemente por fuera del rango de este grupo (*i.e.* 215 a 226 días de E-MF). Así, SW5262 se incorporó al grupo de PC, *Pacha* y *CMS* al grupo de PM y SW370 al de INV, de manera que el resto de la información presentada en el presente capítulo los incluye en estos respectivos grupos (Figura 2.1).

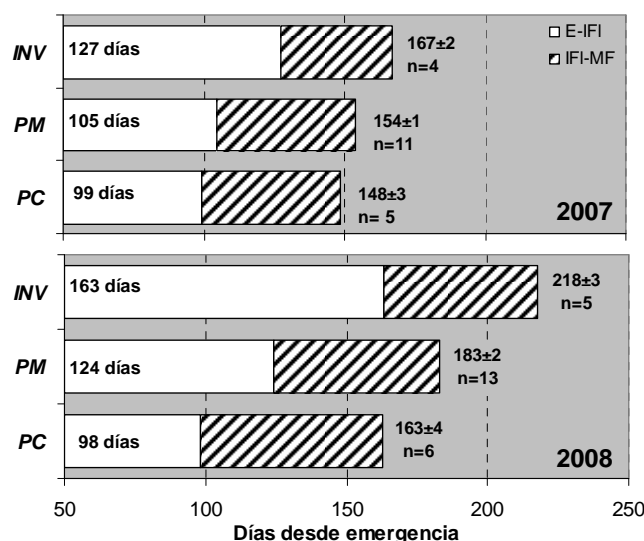


Fig. 2.1. Duración promedio (días) de la etapa emergencia-inicio de floración (E-IFI, barras blancas) e inicio de floración-madurez fisiológica (IFI-MF, barras rayadas para tres grupos de genotipos de colza-canola (PC: primaverales cortos, PM: primaverales medios e INV: primaverales largos) evaluados en Buenos Aires en dos años (2007 y 2008). Los números sobre las barras blancas indican la duración en días de la etapa E-IFI y los números al final de las barras rayadas indican la duración total del ciclo (E-MF) ± error estándar dentro de cada grupo y el número de genotipos incluidos en cada caso.

Como se esperaba, la duración total del ciclo (E-MF) fue diferente en los tres grupos de ciclos evaluados (PC, PM e INV), con ciclos más largos en los genotipos INV en los dos años evaluados, seguidos por los PM, y por último los PC que tuvieron la menor duración del ciclo (Figura 2.1). En 2007, con siembras más tardías y mayores temperaturas durante la etapa postfloración, se observaron menores diferencias en la duración de E-MF entre grupos (19 días entre PC e INV), mientras que en el año 2008, anticipando un mes la siembra, las diferencias entre grupos extremos fue de aproximadamente dos meses (55 días entre PC e INV). Las diferencias en la duración total del ciclo entre grupos se explicaron principalmente por cambios en la duración de la etapa prefloración (E-IFI). Esta etapa representó un 64 y 68 % del total del ciclo en

los primaverales cortos y medios en promedio para ambos años, mientras que en los invernales fue un poco mayor (76 % promediando los dos años).

Expresado en tiempo térmico, la duración del ciclo total en el año 2007 fue de 1793 ± 58 , 1915 ± 18 y 2140 ± 41 °Cd, en promedio para los genotipos de los grupos PC, PM e INV, respectivamente. Mientras que en el año 2008 (siembra más temprana), las duraciones fueron mayores en todos los grupos (2284 ± 65 , 2650 ± 40 y 3437 ± 71 °Cd, en promedio para PC, PM e INV, respectivamente). La proporción del tiempo térmico total que representó la etapa E-IFl en cada grupo de genotipos fue un poco menor a los calculados en días, con valores promedios de ambos años de 57, 61 y 66 % para PC, PM e INV, respectivamente.

Se observó variabilidad entre genotipos en la duración de las etapas pre y postfloración, y en la duración total del ciclo (en días y tiempo térmico) en los dos años evaluados (ver detalles para cada genotipo en Tabla A.1 del Anexo 1). La asociación entre las duraciones de la etapas pre y postfloración (en días y tiempo térmico) permitió observar un cierto ordenamiento de los genotipos (Figura 2.2). Los genotipos invernales se diferenciaron claramente del resto en ambos años por una mayor duración total del ciclo, en días y tiempo término, explicada principalmente por una etapa vegetativa (E-IFl) más larga, tanto en días (Figura 2.2 a) como en tiempo térmico (Figura 2.2 b). Sin embargo, en el año 2008 al expresar las duraciones en tiempo térmico, los genotipos invernales manifestaron un comportamiento diferente con una excesiva prolongación de la etapa de postfloración (IFl-MF), posiblemente debido a que el llenado en esos genotipos ocurrió con temperaturas muy altas, fuera del rango de temperatura óptima estimada por el modelo de tiempo térmico (ver más adelante la Sección 2.3.3 de este capítulo). De esta manera, la duración de la etapa de llenado expresada en tiempo térmico en los genotipos invernales en el año 2008 podría estar sobreestimada. En cuanto a los genotipos PC y PM, la diferenciación entre ellos no fue tan clara, ya que algunos genotipos podrían incluirse en uno u otro grupo según el año, especialmente en el año 2007 cuando la siembra fue más tardía.

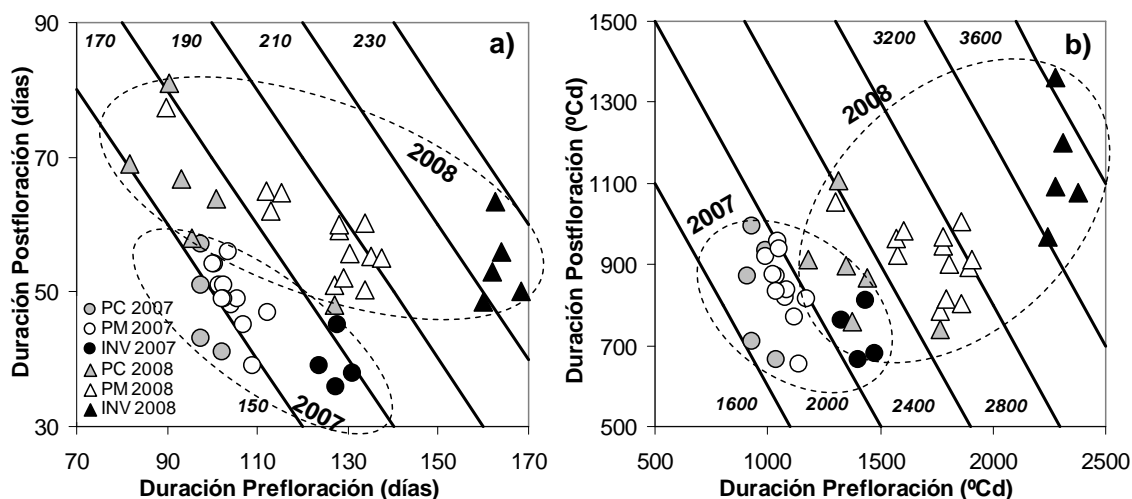


Fig. 2.2. Relación entre la duración de la etapa postfloración (IFl-MF) y la etapa prefloración (E-IFl) expresadas en a) días y b) tiempo térmico (°Cd) para diferentes genotipos de colza-canola evaluados en Buenos Aires en dos años (2007 en círculos y 2008 en triángulos). Los símbolos grises corresponden a los genotipos de ciclo primaveral corto (PC), los blancos a los de ciclo primaveral medio (PM) y los negros a los de ciclo invernal (INV). Se incluyen isolíneas de duración del ciclo total (E-MF, líneas diagonales llenas) en días (entre 150 y 230 días) y tiempo térmico (entre 1600 y 3600 °Cd). Las líneas punteadas agrupan puntos de cada año experimental.

Existieron diferencias entre años en la variabilidad de la fenología, con mayor variabilidad entre genotipos en la duración total del ciclo y en las etapas de pre y postfloración, expresadas tanto en días como en tiempo térmico, en el año 2008 (triángulos en la Figura 2.2 a y b). En el año 2007 todos los puntos se agrupan entre las isolíneas de 150 y 170 días y de 1600 a 2400 °Cd, mientras que en el año 2008, los puntos abarcan casi todo el rango de isolíneas graficado. Por último, existió también variabilidad entre genotipos en la duración relativa de las etapas pre y postfloración para una misma duración total del ciclo, ya que varios genotipos ubicados en la misma isolínea de duración total de ciclo manifestaron distintas combinaciones de duración de ambas sub etapas.

El rendimiento en grano fue diferente entre años (1636 ± 96 y $3111 \pm 134 \text{ kg ha}^{-1}$ promedio de todos los genotipos para el año 2007 y 2008, respectivamente) y variable entre genotipos dentro de cada año (CV entre genotipos de 25 y 21 % para el año 2007 y 2008, respectivamente) (Figura 2.3 y Tabla 2.3). Sin embargo, en el año 2007 no hubo diferencias significativas ($p > 0,05$) entre materiales comerciales debido a la gran variabilidad entre repeticiones (CV entre repeticiones promedio de todos los genotipos de 36 %, con máximos de 70 y 74 % en *Teddy* y *Foremost*), pero tendió a ser mayor en los genotipos de ciclo más corto (2017 ± 171 , 1655 ± 107 y $1298 \pm 202 \text{ kg ha}^{-1}$ en promedio para PC, PM e INV, respectivamente). En el año 2008 (siembra mas temprana), también hubo variabilidad entre repeticiones pero de menor magnitud (CV promedio de 23 %, con máximos de 38 y 49 % en *SRM2836* y *CMS*), hallándose diferencias significativas entre genotipos ($p < 0,05$), con máximos rendimientos en el grupo de primaverales medios (2976 ± 245 , 3437 ± 158 y $2425 \pm 141 \text{ kg ha}^{-1}$ en promedio para PC, PM e INV, respectivamente). En ninguno de los dos años, la mayor duración del ciclo total (en días y tiempo térmico) de los genotipos invernales fue acompañada de mayores rendimientos.

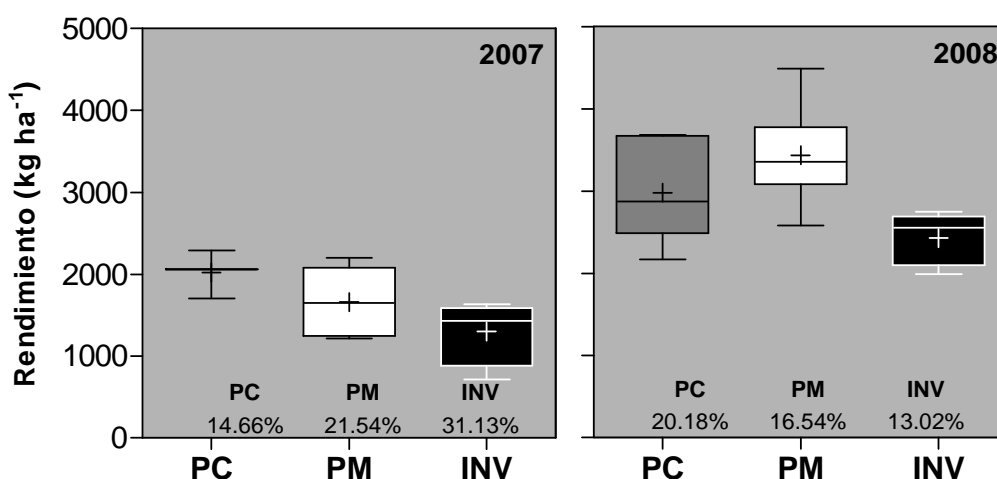


Fig. 2.3. Diagramas de caja y bigote representando la variabilidad en el rendimiento en grano (kg ha^{-1}) para tres grupos de genotipos de colza-canola (PC: primaverales cortos, PM: primaverales medios e INV: invernales) evaluados en Buenos Aires en dos años (2007 y 2008). La cruz dentro de la caja muestra el rendimiento medio de cada grupo de genotipos. En la parte inferior de cada gráfico se indican los coeficientes de variación (%) de cada grupo.

Tabla 2.3. Rendimiento en grano en kg ha⁻¹ (Rto) y momento de ocurrencia del inicio de floración (IFI) para diferentes materiales comerciales de colza-canola evaluados en Buenos Aires en dos años. Las filas grises corresponden a los genotipos de ciclo primaveral corto, las filas blancas a los de ciclo primaveral medio y las filas negras a los de ciclo invernal.

Material	2007		2008	
	Rto (kg ha ⁻¹)	IFI	Rto (kg ha ⁻¹)	IFI
<i>Filial Precoz</i>	ND	06-Sep	2807,7 abcdef	27-Ago
<i>Rivette</i>	ND	11-Sep	2166,7 cdef	27-Jul
<i>Hyola 61</i>	2288,4 a	06-Sep	2939,0 ef	24-Jul
<i>Hyola 432</i>	2060,7 a	04-Sep	2596,7 abcdef	13-Jul
<i>Bio Aureo 2486</i>	1702,0 a	09-Sep	3681,3 abcd	21-Jul
<i>SW 5262*</i>	ND	ND	3667,0 abcd	01-Ago
<i>SRM 2836</i>	1213,0 a	09-Sep	3483,0 abcdef	13-Ago
<i>Legacy</i>	2197,9 a	13-Sep	3353,3 abcde	12-Ago
<i>Impact</i>	1587,1 a	11-Sep	3069,0 abcdef	27-Ago
<i>Foremost</i>	1244,5 a	14-Sep	2577,0 cdef	15-Ago
<i>Eclipse</i>	1488,2 a	10-Sep	3641,0 abcd	28-Ago
<i>SW 2797</i>	1677,3 a	11-Sep	4324,0 ab	29-Ago
<i>Gladiator</i>	2076,7 a	12-Sep	3096,7 abcdef	02-Sep
<i>Filial UofA</i>	2128,3 a	17-Sep	3247,3 abcdef	30-Ago
<i>Biolza 440</i>	1236,8 a	19-Sep	3172,3 abcdef	28-Ago
<i>BioAureo 2386</i>	1707,0 a	11-Sep	3901,3 abc	20-Jul
<i>Jura</i>	1646,4 a	16-Sep	4489,7 a	02-Sep
<i>Pacha*</i>	ND	ND	3649,0 abcd	04-Sep
<i>CMS*</i>	ND	ND	2679,3 def	06-Sep
<i>SW Gospel</i>	1629,3 a	06-Oct	2206,0 ef	07-Oct
<i>Pulsar</i>	1404,2 a	30-Sep	2550,7 cdef	01-Oct
<i>Barrel</i>	709,7 a	08-Oct	2628,3 bcdef	01-Oct
<i>Teddy</i>	1449,1 a	04-Oct	1991,3 f	03-Oct
<i>SW 370*</i>	ND	ND	2749,7 abcdef	29-Sep

Nota: * Genotipos solo incluidos en el año 2008. ND: Datos no disponibles. Letras distintas indican diferencias significativas entre genotipos dentro de cada año ($p < 0,05$).

Para todos los materiales comerciales en los dos años experimentales, se halló una asociación positiva entre el rendimiento en grano y la duración de la etapa postfloración (IFI-MF) expresada en días ($R^2 = 0,34$, Figura 2.4); pero no hubo relación con la duración de la etapa prefloración ($R^2 = 0,01$) ni con el ciclo total ($R^2 = 0,14$), ambos expresados en días. En términos relativos, y considerando todo los genotipos en los 2 años, el rendimiento mostró mayor variabilidad (500 %) que la duración postfloración (200 %). En los genotipos invernales, el llenado tuvo una menor duración en días (símbolos negros en Figura 2.4) y el rendimiento fue más bajo, a pesar de tener mayor duración del ciclo total. También se realizaron ajustes entre el rendimiento y la duración de la etapa postfloración dentro de cada grupo de genotipos, pero las pendientes no fueron significativamente diferentes entre grupos.

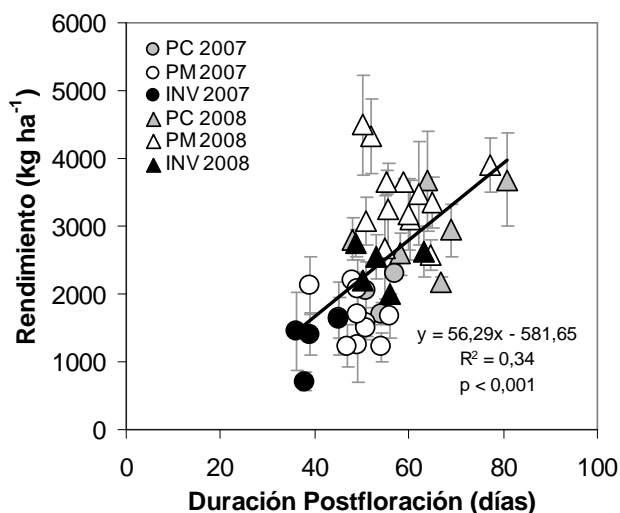


Fig. 2.4. Relación entre el rendimiento en grano (kg ha^{-1}) y la duración de la etapa postfloración (IFl-MF) en días para los diferentes genotipos de colza-canola evaluados en Buenos Aires en dos años (2007 en círculos y 2008 en triángulos). Los símbolos grises corresponden a los genotipos de ciclo primaveral corto (PC), los blancos a los de ciclo primaveral medio (PM) y los negros a los de ciclo invernal (INV). Las barras muestran el error estándar.

2.3.2. Variabilidad en la calidad comercial del grano

El contenido de aceite del grano se mostró mucho más estable que la fenología y el rendimiento entre los distintos genotipos con valores de CV de 2,7 y 5,7 % para el año 2007 y 2008, respectivamente (Figura 2.5 y Tabla 2.4), mientras que los CV para el rendimiento fueron mayores al 20 % (Tabla 2.3). No existió relación entre el contenido de aceite (%) y el rendimiento en grano (Figura 2.5), ya que la mayoría de los genotipos tuvieron alrededor de un 50 % de aceite, a excepción de los genotipos invernales en el año 2008 que mostraron valores inferiores (*i.e.* 44,5 % de aceite promedio entre genotipos INV), explicando el mayor CV entre genotipos obtenido ese año. Al relacionar el porcentaje de aceite con la duración de la etapa de postfloración en días, no se halló relación al incluir ambos años en el análisis ($R^2 = 0,01$). El rendimiento en aceite, siguió el mismo patrón de cambio que el rendimiento en grano (Tabla 2.4), con valores máximos en los genotipos primaverales cortos en 2007 y en los primaverales medios en 2008, y con similar variabilidad genotípica entre años (CV de 25 y 24 % para 2007 y 2008, respectivamente).

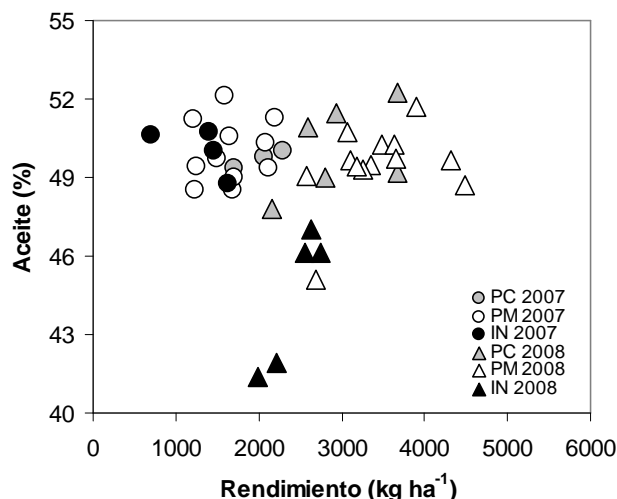


Fig. 2.5. Relación entre el contenido de aceite del grano (%) y el rendimiento en grano (kg ha^{-1}) para diferentes genotipos de colza-canola evaluados en Buenos Aires en dos años (2007 en círculos y 2008 en triángulos). Los símbolos grises corresponden a los genotipos de ciclo primaveral corto (PC), los blancos a los de ciclo primaveral medio (PM) y los negros a los de ciclo invernal (INV).

El contenido de glucosinolatos del grano en general estuvo muy por debajo del límite máximo permitido (*i.e.* $20 \mu\text{moles g}^{-1}$), con valores inferiores a $7 \mu\text{moles g}^{-1}$, a excepción de los genotipos invernales en el año 2008 que en promedio tuvieron valores de $14,5 \mu\text{moles g}^{-1}$ (Tabla 2.4), y del genotipo *Eclipse* en el año 2007 ($11,5 \mu\text{moles g}^{-1}$), donde se sospecha que existió contaminación en la semilla original provista por el semillero con semillas provenientes de otras *Brassicaceae*. En cuanto al perfil de ácidos grasos del grano, el mismo fue muy estable entre genotipos y años (Tabla 2.5), con valores promedios de $7,2 \pm 0,1 \%$, $64,4 \pm 0,3 \%$, $17,9 \pm 0,2 \%$ y $8,9 \pm 0,2 \%$; y CV entre genotipos de 5, 3, 7 y 11 % para los ácidos grasos saturados, oleico, linoleico y linolénico, respectivamente. Al igual que el contenido de aceite y glucosinolatos, los principales cambios en los ácidos grasos los manifestaron los genotipos invernales en el año 2008, con mayores contenidos de saturados (7,7 %) y menores niveles de linolénico (6,8 %) que el resto de los genotipos. El contenido de ácido erúcido (22:1) fue cercano a cero en la mayoría de los materiales comerciales, a excepción de *Filial UofA* en ambos años, *Eclipse* en el 2007 (probablemente por contaminación de la semilla como fue explicado anteriormente) y *Gladiator* en el 2008 que tuvieron valores de 0,8 a 1,8 %, cercanos al máximo permitido (*i.e.* 2 %).

Tabla 2.4. Contenido de aceite en % (AC), rendimiento en aceite en kg ha⁻¹ (Rto AC) y contenido de glucosinolatos en µmoles g⁻¹ (GLU) para diferentes materiales comerciales de colza-canola evaluados en Buenos Aires en dos años (2007 y 2008). Las filas grises corresponden a los genotipos de ciclo primavera corto, las filas blancas a los de ciclo primavera medio y las filas negras a los de ciclo invernal.

Material	2007				2008			
	% AC (%)	Rto AC (kg ha ⁻¹)	GLU (µmoles g ⁻¹)	% AC (%)	Rto AC (kg ha ⁻¹)	GLU (µmoles g ⁻¹)		
Filial Picoz	46,1	ND	5,95	49,0 bcdefgh	1375,8 abcdef	4,43 abcd		
Rivette	51,3	ND	5,20	50,9 abc	1321,7 abcdef	2,93 de		
Hyola 61	50,1	1145,3	2,75	47,8 defgh	1035,7 def	2,33 de		
Hyola 432	49,8	1026,2	3,10	51,4 abc	1511,6 abcdef	1,93 e		
Bio Aureo 2486	49,3	839,6	3,47	52,3 a	1924,1 abc	3,47 bcde		
SW 5262*	ND	ND	ND	49,2 bcdefgh	1804,2 abc	2,87 de		
SRM 2836	51,2	621,1	4,00	50,2 abcde	1749,6 abcd	4,00 abcde		
Legacy	51,3	1126,8	3,50	49,5 abcdefg	1658,8 abcd	2,97 de		
Impact	52,1	826,9	3,90	50,8 abc	1558,0 abcde	3,80 abcde		
Foremost	49,4	614,8	7,80	49,0 bcdefgh	1263,6 cdef	3,23 de		
Eclipse	49,7	739,6	11,50	50,2 abcd	1829,0 abc	2,90 de		
SW 2797	48,6	814,3	3,65	49,6 abcdef	2146,1 a	3,93 cde		
Gladiator	50,3	1045,3	4,90	49,7 abcdef	1538,0 abcdef	6,40 abcde		
Filial UofA	49,3	1050,0	4,67	49,3 abcdefgh	1600,9 abcd	4,47 abcde		
Biolza 440	48,6	600,5	4,95	49,4 abcdefgh	1568,2 abcde	3,27 de		
BioAureo 2386	49,0	836,4	3,20	51,7 ab	2017,0 ab	3,43 de		
Jura	50,6	832,2	6,55	48,7 cdefgh	2186,5 a	5,33 abcde		
Pacha*	ND	ND	ND	49,7 abcdef	1814,8 abc	3,70 abcde		
CMS*	ND	ND	ND	45,1 defgh	1208,4 cdef	6,27 abcde		
SW Gospel	48,8	794,3	7,95	41,9 h	924,3 ef	12,00 ab		
Pulsar	50,8	712,6	6,25	46,1 defgh	1176,7 cdef	14,23 abc		
Barrel	50,6	359,1	4,80	47,0 efgh	1235,3 cdef	12,73 ab		
Teddy	50,1	725,3	5,70	41,4 gh	823,7 f	16,00 a		
SW 370*	ND	ND	ND	46,1 fgh	1268,5 bcdef	17,47 a		

Nota: * Genotipos solo incluidos en el año 2008. ND: Datos no disponibles. Letras distintas indican diferencias significativas entre genotipos en el año 2008 ($p < 0,05$). En el año 2007 no se pudo realizar el análisis estadístico por no poseer repeticiones verdaderas.

Tabla 2.5. Contenido final de ácidos grasos saturados (SAT), ácido oleico (18:1), ácido linoleico (18:2), ácido linolénico (18:3) y ácido erúico (22:1), todos como % del total, para diferentes materiales comerciales de colza-canola evaluados en Buenos Aires en dos años (2007 y 2008). Las filas grises corresponden a los genotipos de ciclo primavera corto, las filas blancas a los de ciclo primavera medio y las filas negras a los de ciclo invernal.

Material	2007					2008				
	SAT (%)	18:1 (%)	18:2 (%)	18:3 (%)	22:1 (%)	SAT (%)	18:1 (%)	18:2 (%)	18:3 (%)	22:1 (%)
Filial Picoz	7,1	63,1	19,8	8,7	0,05	6,5 h	63,8 bcdefgh	18,6 abcde	9,8 abcdef	0,00 b
Rivette	7,7	64,9	18,2	7,8	0,00	7,1 abcdefgh	61,5 gh	18,9 abcde	10,8 a	0,07 ab
Hyola 61	7,8	66,5	15,4	9,1	0,00	7,7 abc	64,0 abcdefgh	15,9 gh	10,9 a	0,00 b
Hyola 432	7,6	67,0	17,2	7,1	0,00	7,3 abcde	63,8 bcdefgh	18,5 abcdef	9,0 bcdefgh	0,00 b
Bio Aureo 2486	7,2	65,8	17,9	7,8	0,00	7,2 abcdef	62,0 fgh	19,1 abc	10,4 ab	0,00 b
SW 5262*	ND	ND	ND	ND	ND	6,8 defgh	64,7 abcde	16,4 fgh	10,3 abc	0,03 ab
SRM 2836	7,3	66,2	16,5	8,7	0,00	6,8 defgh	64,6 abcde	16,9 efgh	10,1 abcd	0,03 ab
Legacy	7,0	65,0	17,7	9,0	0,00	6,7 fgh	64,0 abcdefg	17,5 cdefgh	10,1 abcd	0,07 ab
Impact	7,1	64,0	18,7	9,0	0,00	6,8 efgh	63,8 bcdefgh	18,2 abcdefgh	9,7 abcdefg	0,00 b
Foremost	7,5	65,4	17,2	8,7	0,00	7,0 bcdefgh	64,5 abcde	17,8 bcdefgh	9,1 bcdefgh	0,03 ab
Eclipse	7,3	61,7	18,3	9,8	0,90	7,1 abcdefg	63,0 defgh	17,9 bcdefgh	10,5 ab	0,00 b
SW 2797	7,6	62,5	19,4	9,1	0,00	6,8 efgh	62,9 defgh	18,7 abcde	10,2 abc	0,00 b
Gladiador	7,2	64,1	18,3	9,0	0,00	6,9 cdefgh	62,2 efgh	18,6 abcdef	9,7 abcdefg	0,83 ab
Filial UofA	7,2	63,7	17,1	8,9	0,80	6,9 defgh	61,2 gh	17,2 defgh	10,0 abcde	1,80 a
Biolza 440	7,2	63,8	18,9	8,7	0,10	7,0 bcdefg	63,0 defgh	19,0 abc	9,4 bcdefgh	0,00 b
BioAureo 2386	7,2	65,7	17,7	8,1	0,00	7,1 abcdefgh	60,9 h	19,7 a	10,8 a	0,00 b
Jura	7,2	64,9	18,5	8,0	0,10	6,7 gh	63,6 bcdefgh	19,4 ab	8,9 bcdefgh	0,03 ab
Pacha*	ND	ND	ND	ND	ND	6,7 gh	64,2 abcdefg	18,8 abcd	8,5 defgh	0,20 ab
CMS*	ND	ND	ND	ND	ND	7,1 abcdefg	62,1 cdefgh	20,3 abc	8,8 cdefgh	0,10 ab
SW Gospel	7,7	65,7	16,1	9,4	0,00	8,4 a	65,5 abc	18,4 abcdefg	6,3 h	0,00 b
Pulsar	6,7	67,2	16,1	8,7	0,00	7,2 abcdef	67,8 ab	16,8 efgh	6,9 fgh	0,00 b
Barrel	7,2	69,4	14,0	8,0	0,00	7,3 abcd	69,3 a	15,7 h	6,2 gh	0,00 b
Teddy	7,6	64,9	16,7	9,1	0,30	8,0 a	64,8 abcd	18,8 abcde	7,1 fgh	0,00 b
SW 370*	ND	ND	ND	ND	ND	7,5 abc	64,5 abcdef	19,3 ab	7,3 efgh	0,00 b

Nota: * Genotipos solo incluidos en el año 2008. ND: Datos no disponibles. Letras distintas indican diferencias significativas entre genotipos en el año 2008 ($p < 0,05$). En el año 2007 no se pudo realizar el análisis estadístico por no poseer repeticiones verdaderas.

2.3.3. Análisis de las condiciones ambientales durante el PCr y el llenado de granos

El ambiente explorado durante el período postfloración fue diferente para cada genotipo según el momento de ocurrencia de la floración (Tabla 2.3) y la marcha anual de las temperaturas y la radiación incidente (Figura 2.6). Como se observó con anterioridad, en el año 2008, se manifestaron mayores diferencias entre genotipos en el momento de inicio de la floración, lo que determinó mayores cambios en el ambiente explorado por los mismos. Particularmente los genotipos de ciclo invernal ubicaron su período de llenado más tardíamente en el año, quedando expuestos a muy altas temperaturas a partir de principios de noviembre, explorando temperaturas máximas diarias supra óptimas durante parte de esta etapa ($>30^{\circ}\text{C}$).

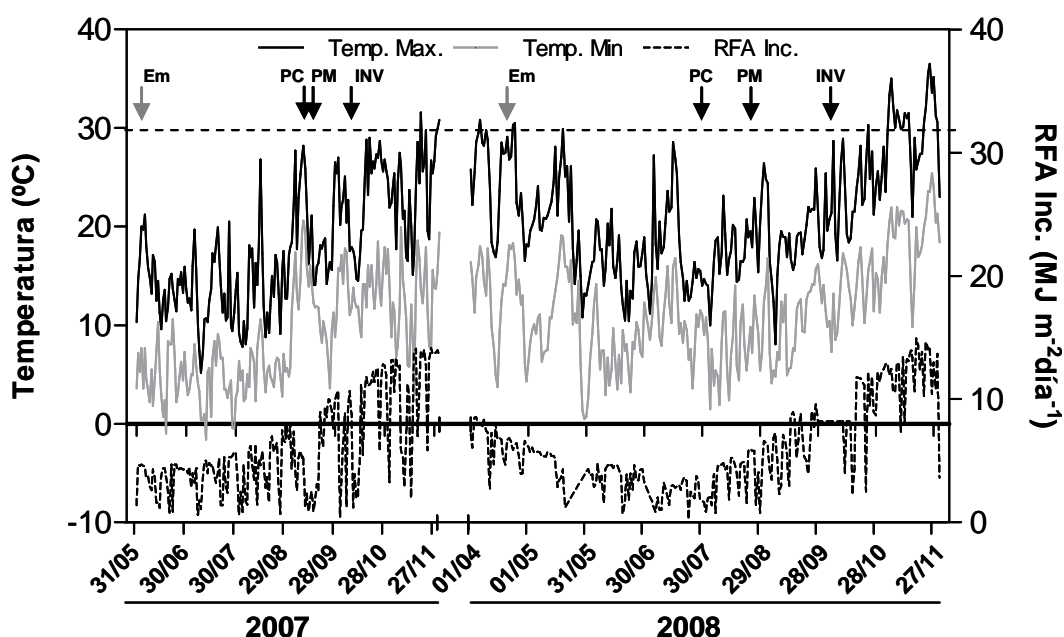


Fig. 2.6. Evolución de la temperatura mínima y máxima ($^{\circ}\text{C}$) y de la radiación fotosintéticamente activa incidente (RFAinc en $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) durante los años 2007 y 2008 en Buenos Aires. Las flechas grises indican la emergencia del cultivo en cada año y las flechas negras el inicio de floración promedio de cada grupo de genotipos: primaverales cortos (PC), primaverales medios (PM) e invernales (INV). La línea punteada marca los 30°C de temperatura, que indica la temperatura por encima de la cual el cultivo exploraría temperaturas supra-óptimas.

El ambiente fototermal (radiación incidente y temperatura) explorado durante la etapa de postfloración fue diferente entre genotipos de colza-canola en ambos años. El rendimiento se asoció levemente y de forma negativa con la temperatura media ($y = -198,1x + 5795,7$; $R^2 = 0,21$), máxima ($y = -162,8x + 5937,7$; $R^2 = 0,16$) y mínima ($y = -221,8x + 5173,7$; $R^2 = 0,22$) promedio de toda la etapa, no observándose asociación significativa con la radiación incidente acumulada ($p = 0,90$). Cuando se analizaron las condiciones ambientales sólo en el período crítico (de 0-350 $^{\circ}\text{Cd}$ desde el inicio de floración; Habekotté, 1997b) de cada material comercial, la asociación entre el rendimiento y la temperatura media fue mayor que al considerar toda la etapa postfloración (Figura 2.7 a). Llamativamente, las relaciones entre el rendimiento y (i) la RFAinc media, y (ii) la RFAinc acumulada durante el PCr fueron negativas, aunque esta última no significativa. Estos resultados sugieren una covariación entre la temperatura y la radiación, que fue confirmada por la asociación positiva entre ambas variables

climáticas ($RFA_{inc} = 0,76 \text{ Temp.} - 5,48$; $R^2 = 0,80$; $p < 0,001$) y por la ausencia de relación entre el rendimiento y los residuales de la relación RFA_{inc} /temperatura media (Fig. 2.7 b). No existió asociación entre el rendimiento y el cociente fototermal en el PCr, que incluye a la radiación y la temperatura media ($p = 0,13$) (Figura 2.7 c), pero sí fue significativa, con un muy bajo ajuste, la relación entre el rendimiento y el Q en toda la etapa postfloración ($y = -6755,5x + 5435,3$; $R^2 = 0,12$; $p = 0,03$).

El contenido de aceite del grano se correlacionó negativamente con la temperatura mínima, media y máxima promedio y con la RFA incidente acumulada durante la etapa de postfloración (Tabla 2.6). En cuanto al perfil de ácidos grasos, el ácido linolénico (18:3) fue el más sensible a los cambios en las condiciones ambientales durante la etapa de postfloración (mayores coeficientes de correlación). Los contenidos de 18:3 y glucosinolatos del grano estuvieron positiva y negativamente relacionados, respectivamente, con el contenido de aceite y con las condiciones ambientales, aunque siempre en sentido inverso entre sí. En la matriz de correlación de la Tabla 2.6 también pueden observarse algunas relaciones típicas entre ácidos grasos en esta especie (*e.g.* asociación negativa entre 18:1 y 18:2).

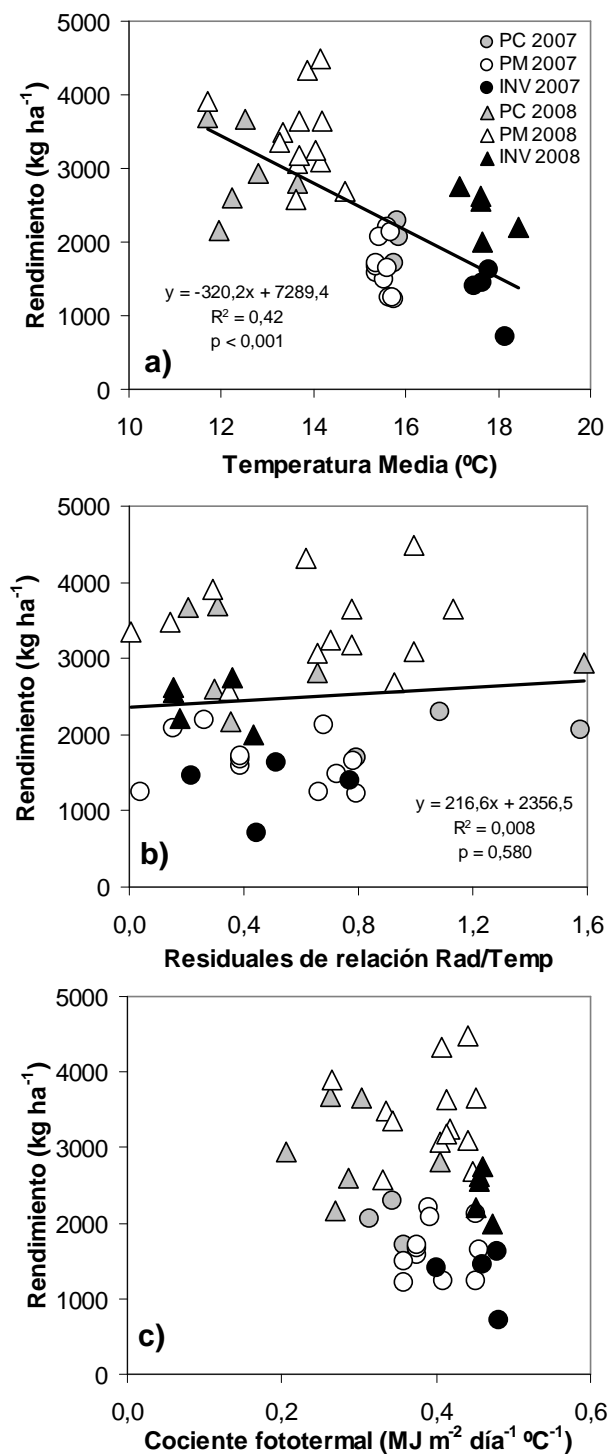


Fig. 2.7. Relación entre el rendimiento en grano (kg ha⁻¹) y a) la temperatura media (°C), b) los residuales de la relación RFA incidente media (MJ m⁻² día⁻¹) y Temperatura media (°C), y c) el cociente fototermal (MJ RFAinc m⁻² día⁻¹ °C⁻¹) en el período crítico (inicio de floración + 350 °Cd) para diferentes genotipos de colza-canola evaluados en Buenos Aires en dos años (2007 en círculos y 2008 en triángulos). Los símbolos grises corresponden a los genotipos de ciclo primaveral corto (PC), los blancos a los de ciclo primaveral medio (PM) y los negros a los de ciclo invernal (INV).

Tabla 2.6. Matriz de correlación entre el rendimiento en grano (Rto), contenido de aceite (%AC), rendimiento en aceite (Rto AC), contenido de glucosinolatos (GLU), ácidos grasos saturados (SAT), ácido oleico (18:1), ácido linoleico (18:2), ácido linolénico (18:3), ácido erúico (22:1), temperatura mínima (Temp Min), media (Temp Med) y máxima (Temp Max) durante postfloración y RFA incidente acumulada durante postfloración (RFA inc Ac) para todos los materiales comerciales evaluados en Buenos Aires en dos años (2007 y 2008). En negrita se resaltaron los coeficientes \geq al módulo de 0,50.

Variables	Rto	% AC	Rto AC	GLU	SAT	18:1	18:2	18:3	22:1
Rto	---								
% AC	0,06	---							
Rto AC	0,99	0,17	---						
GLU	-0,19	-0,69	-0,26	---					
SAT	-0,45	-0,47	-0,50	0,42	---				
18:1	-0,47	-0,13	-0,49	0,27	0,24	---			
18:2	0,40	-0,15	0,39	0,03	-0,15	-0,72	---		
18:3	0,41	0,52	0,48	-0,61	-0,46	-0,68	0,11	---	
22:1	0,05	0,04	0,05	0,04	-0,14	-0,39	-0,02	0,20	---
Temp Min	-0,47	-0,59	-0,54	0,76	0,49	0,56	-0,16	-0,85	-0,03
Temp Med	-0,46	-0,61	-0,53	0,79	0,49	0,58	-0,20	-0,83	-0,03
Temp Max	-0,40	-0,59	-0,54	0,76	0,49	0,56	-0,16	-0,85	-0,03
RFA inc Ac	0,02	-0,58	-0,05	0,66	0,32	0,27	-0,02	-0,50	-0,02

La mayoría de las variables evaluadas mostraron una alta correlación con la temperatura media promedio durante la etapa postfloración (Tabla 2.6), en el rango de temperaturas explorado en este trabajo (13-22 °C), obteniéndose las relaciones más sólidas con el contenido de aceite (Figura 2.8 a), los glucosinolatos (Figura 2.8 b) y el 18:3 (Figura 2.8 c). Para el contenido de aceite y los glucosinolatos se establecieron relaciones bi-lineales, con pendiente neutra al inicio y luego negativa en el primer caso, y ambas pendientes positivas para los glucosinolatos. Las temperaturas umbrales fueron similares en ambos modelo (*i.e.* 19 y 18 °C para aceite y glucosinolatos, respectivamente). Para el contenido de 18:3, la relación fue lineal negativa en todo el rango de temperaturas exploradas durante el llenado. Para las tres variables evaluadas, los genotipos invernales en el año 2008 (triángulos negros) se alejaron del resto y mostraron bajos contenidos de aceite y ácido linolénico, y un mayor nivel de glucosinolatos en el grano. Además, causaron los cambios en las pendientes en las Figuras 2.8 a y b. Esto podría estar relacionado con temperaturas supra óptimas durante el momento de definición de la calidad del grano (*i.e.* llenado de los granos), ya que se contabilizaron en este grupo de genotipos entre 11 y 19 días en el llenado con temperaturas máximas mayores a 30 °C, cuando en algunos PM sólo hubo un día con estas temperaturas y ningún día en los PC.

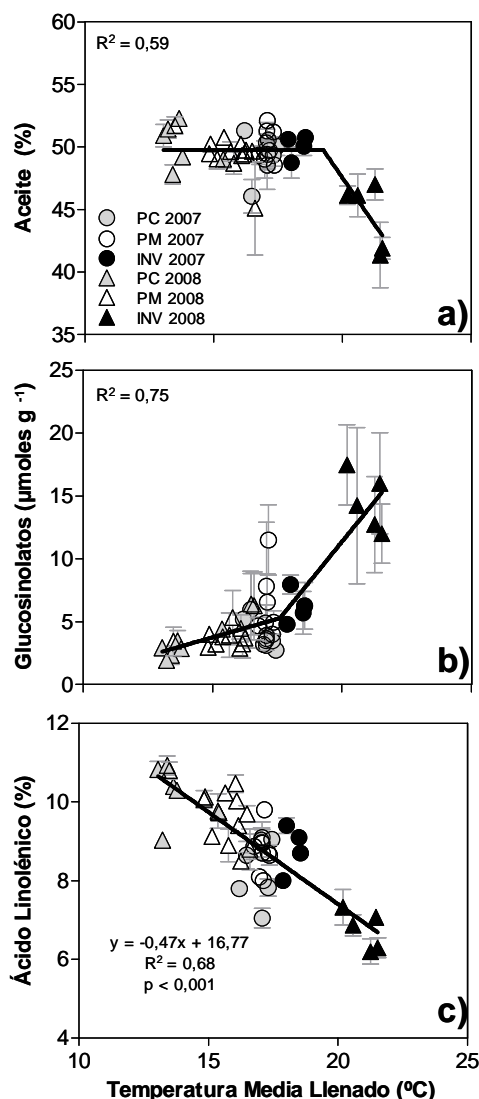


Fig. 2.8. Relación entre a) el contenido de aceite (%), b) glucosinolatos ($\mu\text{moles g}^{-1}$) y c) ácido linolénico (%) y la temperatura media ($^{\circ}\text{C}$) durante el llenado de los granos (IFl-MF) para diferentes genotipos de colza-canola evaluados en Buenos Aires en dos años (2007 en círculos y 2008 en triángulos). Los símbolos grises corresponden a los genotipos de ciclo primaveral corto (PC), los blancos a los de ciclo primaveral medio (PM) y los negros a los de ciclo invernal (INV). Las barras indican el error estándar. En a) y b) se muestra un modelo bi-lineal, con puntos de quiebre de 19,3 y 17,6 $^{\circ}\text{C}$. Las pendientes por debajo del umbral son de 0 y 0,58; y por encima son de -2,9 y 2,5 para aceite y glucosinolatos, respectivamente.

2.4. DISCUSIÓN

En este capítulo se analizó la variabilidad en el rendimiento y la calidad comercial del grano en un amplio rango de genotipos comerciales de colza-canola disponibles en Argentina evaluados en Buenos Aires durante dos años consecutivos, asociando los distintos atributos de rendimiento y calidad con las condiciones ambientales (*i.e.* temperatura y radiación) durante la etapa de postfloración y el periodo crítico del cultivo. Los resultados mostraron que el rendimiento en grano resultó ser más variable ($\text{CV} = 37\%$ para todos los genotipos en los 2 años) que los principales parámetros de calidad; sin embargo, la calidad comercial también estuvo fuertemente

comprometida cuando las condiciones ambientales durante el llenado no fueron las óptimas (*i.e.* altas temperaturas postfloración en genotipos invernales).

El rendimiento en grano promedio fue variable entre años, con rendimientos promedios para todos los genotipos de 1636 ± 96 y 3111 ± 134 kg ha⁻¹, y coeficientes de variación de 25 y 21 % entre genotipos para el 2007 y 2008, respectivamente (Figura 2.3). Los altos valores de CV muestran la variabilidad en el rendimiento entre los distintos genotipos evaluados (Tabla 2.3), que resultó acorde a lo esperado, debido a que son materiales introducidos desde varias partes del mundo, seleccionados para ambientes muchas veces distintos de los explorados en este capítulo de tesis. Esta variabilidad genotípica es superior a la hallada en evaluaciones en la localidad de Barrow, donde en ensayos de fechas de siembra utilizando genotipos primaverales e invernales obtuvieron coeficientes de variación entre 8 y 16% (Iriarte, 2006; 2005), pero es similar a la hallada en algunos años y localidades evaluadas en la red de ensayos del INTA (Iriarte *et al.*, 2007). En ambos años, los genotipos invernales ampliaron la variabilidad del rendimiento, ya que tuvieron menores rindes que el resto de los genotipos, lo que se asoció con una menor duración de la etapa de postfloración (Figura 2.4) que probablemente afectó de forma negativa la duración del período crítico de generación del rendimiento, tal como se observó en esta tesis. Habekotté (1997b), utilizando modelos de simulación y evaluando varias opciones para incrementar el rendimiento y su impacto sobre numerosas variables del cultivo (*e.g.* índice de área foliar, número de granos y silicuas, producción de biomasa, etc.), concluyó que los genotipos que maximizan el rendimiento son aquellos que combinan una floración temprana con una prolongada duración del llenado de granos. En las condiciones experimentales de Buenos Aires, posiblemente los genotipos invernales no expresaron todo su potencial de rendimiento, debido a que prolongaron en exceso la etapa vegetativa, ubicando el llenado en condiciones ambientales desfavorables (*i.e.* altas temperaturas). Estos resultados alertan sobre el difundido concepto a nivel técnico-productivo que supone que los genotipos invernales presentan *siempre* un mayor potencial de rendimiento respecto de los primaverales debido a que acumulan una mayor cantidad de biomasa durante un mayor período. Ese mayor potencial es claro en ambientes productivos de Francia y Alemania, o en ambientes del sur de la Provincia de Buenos Aires, donde se cubren los requerimientos de frío y el riesgo de altas temperaturas postfloración es bajo, pero claramente no se cumple en ambientes productivos del norte de Buenos Aires, donde los inviernos son mucho más benignos y es mayor el riesgo de altas temperaturas durante el llenado.

El rendimiento en grano de todos los genotipos en ambos años, para estas condiciones experimentales, no se asoció con el cociente fotothermal durante el período crítico (Figura 2.7 c). Estos resultados contrastan con lo observado en trigo (Magrin *et al.*, 1993; Fischer, 1985), cebada (Arisnabarreta y Miralles, 2008), arveja (Poggio *et al.*, 2005) y en menor medida en girasol (Cantagallo *et al.*, 1997), donde un mayor Q en el período crítico se asoció a mayor número de granos y rendimiento. Esta falta de asociación en colza-canola podría estar relacionada con la inexistente relación entre el rendimiento y la radiación incidente durante el PCr, lo cual quedó evidenciado cuando se analizaron los residuales de la relación RFAinc/Temp. media (que representan la variación de la radiación no asociada con la temperatura) en la Figura 2.7 b. Otras posibles limitantes para el uso del Q en colza-canola pueden estar asociadas con la gran longitud del período crítico y la biología floral que permite la generación de gran parte del número de granos por planta en las ramificaciones, importante en definir niveles de plasticidad del número de granos; y la ocurrencia de períodos de muy alta temperatura durante el período crítico, que están por fuera del rango de temperaturas cardinales del

modelo de tiempo térmico, las cuales no han sido aún fehacientemente determinadas mediante experimentación directa en este cultivo. Muy altas temperaturas durante algunos días consecutivos producen respuestas detrimentales en la generación y fijación de estructuras reproductivas que no son capturadas por el cociente fototermal ni por modelos más complejos de simulación de cultivos (Semenov y Porter, 1995; White *et al.*, 2005). Esta limitación del modelo de tiempo térmico también pudo observarse al expresar la duración de la etapa postfloración en TT, donde los genotipos invernales, que claramente experimentaron temperaturas supra-óptimas, se alejaron del resto con mayores duraciones en tiempo térmico (Figura 2.3 b). Por lo tanto, serán necesarios estudios ecofisiológicos para comprender las causas de la ausencia de asociación entre estas variables en colza-canola y la forma de crear índices ambientales superadores que se ajusten mejor al rendimiento logrado. En este sentido, la cuantificación del número de granos por m^{-2} (información no disponible por el momento para estos ensayos), puede implicar mejoras en los ajustes al reemplazar el rendimiento por dicho componente numérico. Por otro lado, la utilización de la radiación interceptada por el cultivo también puede mejorar los ajustes, ya que este cultivo tiene la particularidad de reemplazar la fotosíntesis de hojas por silicuas en floración, lo que podría generar cambios en la capacidad de fotosíntesis del cultivo.

El contenido de aceite del grano tuvo valores promedios de $49,2 \pm 0,3$ % (y un rango de 41,4 y 52,3 %) en ambos años (Tabla 2.4), con una proporción importante (96 %) de valores superiores a las normas de comercialización de Argentina (43 %), e incluso algo mayores a los valores alcanzados en zonas más frías de producción del país, como Tres Arroyos, donde se han obtenido contenidos máximos de aceite de 47 % (Iriarte, 2004). El perfil de ácidos grasos del grano, promedio para todos los genotipos en ambos años (que fue de $7,1 \pm 0,1$, $64,4 \pm 0,3$, $17,9 \pm 0,2$, $8,9 \pm 0,2$ % para SAT, oleico, linoleico y linolénico, respectivamente; Tabla 2.5), fue semejante al definido en países de larga trayectoria de producción, como Canadá (Canola Council, 2010). La calidad de aceite en los genotipos comerciales de Argentina evaluados en el presente estudio, bajo condiciones de producción, caracteriza al aceite de colza-canola como un aceite de alto valor nutricional, destacado por su bajo contenido de ácidos saturados, y alto contenido de monoinsaturados (McDonald, 1995). Sin embargo, los genotipos invernales, especialmente en el año 2008, tuvieron una menor calidad del grano, con menores contenidos de aceite (44,5 %) y ácido linolénico (6,8 %) acompañado de un mayor nivel de SAT (7,7 %). Esto es un primer llamado de atención para este grupo de genotipos, que presentaron un comportamiento diferencial en calidad, y que tampoco se destacaron por un mayor rendimiento en grano.

El contenido de glucosinolatos del grano estuvo muy por debajo del límite máximo permitido (*i.e.* $20 \mu\text{moles g}^{-1}$), con valores inferiores a $7 \mu\text{moles g}^{-1}$ (Tabla 2.4), pero existieron algunos genotipos con niveles de glucosinolatos mayores a los esperados, como (i) los genotipos invernales ($6,2$ y $14,5 \mu\text{moles g}^{-1}$ en promedio en 2007 y 2008) y (ii) *Eclipse* en el año 2007 ($11,5 \mu\text{moles g}^{-1}$). El comportamiento de los invernales se asocia a las condiciones ambientales experimentadas durante la etapa postfloración. En cuanto al genotipo *Eclipse*, se sospecha que existió contaminación en la semilla original ese año con semilla provenientes de otras *Brassicas*, debido a que también manifestó contenidos de ácido erúxico altos (0,9 %), motivo por el cual se midió el perfil de ácidos grasos de la semilla original, encontrándose valores de erúxico de 3,5 %. Algo similar ocurrió en el genotipo *Filial UofA*, que también tuvo valores altos de ácido erúxico (0,8 y 1,8 % en 2007 y 2008), aunque sus valores de glucosinolatos fueron bajos. La contaminación de semillas de colza-canola (0 erúxico y glucosinolatos) con especies de malezas emparentadas (alto erúxico y glucosinolatos)

surge como un problema adicional para la difusión del cultivo en Argentina, ya que estos inconvenientes pueden implicar el rechazo a nivel comercial del grano cosechado. Será necesario un mayor control a nivel empresarial y gubernamental de la pureza varietal de la semilla comercial de colza-canola en Argentina, para evitar estos posibles inconvenientes a mayor escala.

El análisis de las condiciones ambientales durante la etapa de postfloración permitió identificar a la temperatura media promedio como el factor ambiental de mayor influencia sobre las variables de rendimiento y calidad del grano (Tabla 2.6). El rendimiento en grano se asoció negativamente con la temperatura media durante la etapa de postfloración, con caídas de 198 kg de grano ha⁻¹ (Tabla 2.6), y durante el período crítico (Figura 2.7 a), con una mayor tasa de caída (*c.a.* 320 kg grano ha⁻¹) y un mejor ajuste de la regresión. Estas tasas de caídas fueron similares a las halladas por Si y Walton (2004) (-289 kg ha⁻¹ °C⁻¹) y por Walton *et al.* (1999) (-268 kg ha⁻¹ °C⁻¹), para igual rango de temperaturas exploradas (13 a 22 °C), también en condiciones de campo. El contenido de aceite también se asoció negativamente con la temperatura (Tabla 2.6), pero mostró un patrón de caída bi-lineal (Figura 2.8 a), como el propuesto por Robertson y Holland (2004) para un rango similar de temperaturas (10 a 24 °C), aunque con una temperatura umbral ligeramente superior (14 vs. 19 °C, en la presente tesis), lo que podría indicar mayor adaptabilidad a la temperatura en los genotipos introducidos en Argentina. Los resultados del presente estudio confirman que temperaturas moderadamente bajas durante el llenado de los granos son necesarias para maximizar el rendimiento y el contenido de aceite del grano de colza-canola, y esto podría lograrse explorando ambientes frescos durante el llenado de granos a partir de un inicio de floración temprano en primavera, una vez superado el riesgo de heladas tardías. En este contexto, la correcta elección de la fecha de siembra es clave para evitar (i) el riesgo de heladas tempranas (*i.e.* antes del estado de roseta) y tardías (*i.e.* heladas en floración) y (ii) lograr una floración temprana de modo de exponer al cultivo a condiciones de temperaturas frescas durante el llenado de los granos.

Los perfiles acídicos del aceite también se vieron alterados por las temperaturas medias promedio durante la etapa postfloración en los dos años de análisis (Tabla 2.6). El ácido linolénico fue quien mostró la mayor asociación negativa con la temperatura media del llenado (Figura 2.8 c), con caídas de 0,47 puntos porcentuales por cada °C de aumento de temperatura media en el rango de 13 a 22 °C, acompañado por un aumento del contenido de oleico (5 puntos). Resultados similares fueron hallados por Werteker *et al.* (2010) para colza-canola en ensayos a campo en Austria, con caídas de 0,4-0,5 puntos porcentuales de 18:3 por cada grado por encima de 20 °C de temperatura media durante los 30 días previos a la cosecha. Muchos otros trabajos también muestran que el nivel de instauración del aceite de colza-canola (especialmente el % de 18:3) se favorece en llenados bajo condiciones frescas (Baux *et al.*, 2008; Triboui-Blondel y Renard, 1999; Trémolières *et al.*, 1982), debido a una inhibición reversible de la actividad desaturasa en el grano a altas temperaturas (Matsuda *et al.*, 2005). Estas fueron las condiciones que exploraron los genotipos primaverales cortos, en especial en el año 2008, lo que explica su mayor contenido de ácido linolénico en grano. De este modo, la exposición del llenado de granos a temperaturas elevadas no solo afecta el contenido relativo de aceite en los granos, sino también la composición del aceite.

La temperatura media durante postfloración se asoció positivamente con el contenido de glucosinolatos del grano (Figura 2.8 b), mostrando también un patrón bi-lineal. Aunque no existe un modelo similar en la bibliografía con efectos térmicos, si existen trabajos que muestran que algunos estreses son capaces de aumentar el contenido de glucosinolatos en grano. Aksouh *et al.* (2001), en condiciones controladas,

también hallaron más glucosinolatos cuando las plantas tuvieron temperaturas máximas de 40 °C durante 5 días en postfloración, en comparación con los controles sin estrés (21/16 °C, día/noche). Jensen *et al.* (1996) también hallaron respuestas bi-lineales en el contenido de glucosinolatos en ensayos de sequía en pre y postfloración a campo en Dinamarca, con aumentos del contenido de glucosinolatos con más de 6 días de estrés hídrico o menos de -1,4 MPa de potencial agua en hojas y silicuas, y sin cambios por arriba de estos umbrales, atribuyendo esto al incremento en la acumulación de metabolitos secundarios (entre ellos los glucosinolatos) probablemente asociado a la expresión de genes en respuesta a la caída en la turgencia de hojas y silicuas (Stroehrer *et al.*, 1995). En esta tesis, los mayores cambios en los glucosinolatos se debieron al comportamiento de los genotipos invernales en el año 2008, que manifestaron un mayor contenido de glucosinolatos en grano, produciendo un cambio en la pendiente del ajuste en coincidencia con las mayores temperaturas en postfloración. Además, tuvieron más de 10 días con altas temperaturas (máximas > 30 °C) en el llenado, experimentado condiciones de estrés térmico, similares a los tratamientos impuestos por Aksouh *et al.* (2001). Sin embargo, no se observó un efecto de las altas temperaturas en el llenado cuantificable a través de la variable carga de calor (que contabiliza las horas en que el cultivo estuvo a una temperatura superior a un determinado umbral; Rondanini *et al.*, 2006), utilizando umbrales de 25 y 30 °C. Este modelo bi-lineal de respuesta del contenido de glucosinolatos a la temperatura podría indicar un cambio en la respuesta a valores altos de temperatura en el llenado (al igual que lo observado en ensayos de sequía), o bien una diferente respuesta de los genotipos INV, que requiere mayor experimentación.

2.5. CONCLUSIONES

Sobre la base de los resultados obtenidos es posible concluir que se observó una importante variabilidad intra e interanual del rendimiento y, en menor medida, de la calidad del grano para distintos genotipos de colza-canola disponibles en Argentina. Los cambios en el rendimiento en grano no pudieron asociarse directamente al cociente fototermal experimentado durante el período crítico de determinación del rendimiento, seguramente debido a que la temperatura fue el factor ambiental fundamental que explicó los cambios en rendimiento, y que las variaciones en radiación fueron simplemente una covariable. Las principales causas de la variabilidad de los materiales comerciales de colza-canola evaluados fueron: (i) la fecha de siembra que modificó las temperaturas exploradas durante el ciclo, reduciendo las diferencias entre genotipos invernales y primaverales al atrasar la misma (ii) la fenología de cada material que determinó el momento de ocurrencia y la duración del llenado; (iii) las temperaturas medias exploradas durante el llenado de los granos que afectaron fuertemente el rendimiento en grano, el contenido de aceite y en menor magnitud al perfil de ácidos grasos.

Los resultados obtenidos sugieren que la maximización de los rendimientos combinada con una adecuada calidad del grano, desde el punto de vista de la fenología del cultivo, estarían vinculados a una floración temprana y prolongada duración de la etapa de postfloración, bajo condiciones de temperaturas frescas. La estrategia de manejo para concretar este objetivo se vincularía con siembras tempranas (tanto como lo permita el riesgo de heladas tardías del ambiente objetivo) para evitar explorar temperaturas elevadas durante el llenado de los granos, y de esta manera maximizar el rendimiento y la calidad del grano. La evaluación del amplio número de genotipos

llevado a cabo en el marco de esta tesis demuestra que en Argentina existen materiales comerciales de colza-canola con distinto potencial de rendimiento, debido a la fecha de siembra y el grupo (PC, PM e INV), si bien no pareció haber un efecto importante del grupo al que pertenece el genotipo sobre el potencial de rendimiento cuando el cultivo exploró temperaturas similares durante el llenado. Especial atención requiere la elección de las fechas de siembra y zonas de producción para los genotipos invernales, ya que como fue mostrado antes, son más propensos a experimentar situaciones desfavorables durante el llenado en ambientes pampeanos con alta variabilidad térmica.

En el presente capítulo se analizó la variabilidad en rendimiento y calidad de materiales comerciales de colza-canola de Argentina evaluados a campo en Buenos Aires en dos años consecutivos, identificando a la temperatura durante el llenado de los granos como el factor ambiental más importante en la determinación del rendimiento y la calidad comercial. En los siguientes capítulos de esta tesis se analizarán, en dos de los genotipos del grupo PM, los efectos de la fertilización con N y S aplicada durante todo el ciclo de cultivo sobre la generación de biomasa, el rendimiento y sus componentes fisiológicos y numéricos (Capítulo 3), así como también sobre la modificación de la calidad del grano (Capítulo 4), como posibles estrategias de maximización del rendimiento y la calidad del cultivo de colza-canola.

FERTILIZACION CON NITRÓGENO Y AZUFRE DURANTE EL CICLO DE
CULTIVO: EFECTO SOBRE LOS COMPONENTES FISIOLÓGICOS DEL
RENDIMIENTO

- 3.1. Introducción
- 3.2. Materiales y Métodos
 - 3.2.1. Descripción de los experimentos
 - 3.2.2. Mediciones
 - Fenología y dinámica de aparición de órganos reproductivos
 - Biomasa, rendimiento y componentes
 - Eficiencia de uso del nitrógeno
 - 3.2.3. Análisis estadísticos
- 3.3. Resultados
 - 3.3.1. Fenología
 - 3.3.2. Producción de biomasa y sus componentes fisiológicos
 - 3.3.3. Rendimiento en grano y sus componentes numéricos
 - 3.3.4. Eficiencia de uso del nitrógeno
- 3.4. Discusión
- 3.5. Conclusiones

3.1. INTRODUCCIÓN

La nutrición es uno de los factores más importantes que afectan el crecimiento y rendimiento del cultivo de colza-canola, en especial la disponibilidad de nitrógeno (N) y azufre (S) (Zhao *et al.*, 1993). Los elevados requerimientos de estos nutrientes llevaron a la existencia de recomendaciones de manejo de nutrientes basadas en relaciones N:S en suelo de 7:1 (Grant y Bailey, 1993), pero las interacciones entre estos nutrientes no han sido analizadas suficientemente en relación a su impacto en la fisiología de generación del rendimiento del cultivo.

El número de granos es el componente que más explica los cambios en el rendimiento en colza-canola (Peltonen-Sainio y Jauhiainen, 2008; Scarisbrick *et al.*, 1981), y es más sensible que el peso del grano a cambios en la disponibilidad de nitrógeno (Ogunlela *et al.*, 1990; Hocking y Mason, 1993). Los efectos del S sobre los componentes numéricos del rendimiento han sido mucho menos estudiados, observándose pocos efectos significativos sobre el peso y número de granos (Asare y Scarisbrick, 1995).

En situaciones de deficiencias de nitrógeno, la fertilización con este nutriente incrementa la producción de biomasa del cultivo (Hocking *et al.*, 1997), sin cambios significativos en la partición a grano (Hocking *et al.*, 1997; Schjoerring *et al.*, 1995; Hocking y Stapper, 1993). El mayor impacto del N en general se ha observado en la RFAint, que aumenta ante una mayor oferta nutricional (Dreccer *et al.*, 2000; Justes *et al.*, 2000), ya que la EUR es un atributo más conservativo (Andersen *et al.*, 1996; Wright *et al.*, 1988). Sin embargo, otras evidencias mostraron aumentos de EUR en respuesta a la aplicación de N tanto en colza-canola (Dreccer *et al.*, 2000; Hansen, 1994) como en otras oleaginosas (Massignam *et al.*, 2009). En cuanto a la partición a raíz, trabajos en condiciones semi-controladas en macetas con fertilización líquida, observaron que la fertilización con N redujo la relación raíz:tallo (Schulte auf m Erley *et al.*, 2007; Dreccer *et al.*, 2000). La poca información existente sobre el efecto del S sobre los componentes fisiológicos de la biomasa y la partición a grano y raíz, así como su interacción con N, muestran la necesidad de realizar estudios más profundos del efecto de la nutrición sobre la partición a grano y a raíz, considerando ambos nutrientes.

La eficiencia agronómica de uso del nitrógeno (EAUN: $\text{kg grano kg N disponible o N aplicado}^{-1}$) se reduce al aumentar la disponibilidad de N, siguiendo la ley de los rendimientos decrecientes tanto en colza-canola (Dreccer *et al.*, 2000; Hocking *et al.*, 1997) como en trigo (Timsina *et al.*, 2001; Doyle y Holford, 1993). En trigo, Salvagiotti *et al.* (2009) hallaron aumentos de la EAUN debido a incrementos en la oferta de S, explicados únicamente por incrementos de la eficiencia de absorción (EAN). Este efecto del S indica la existencia de interacción entre ambos nutrientes sobre las eficiencias de uso del N. Al presente no existen estudios similares de interacción NxS en el cultivo de colza-canola.

Así, el objetivo de este capítulo es estudiar los cambios generados por la fertilización nitrogenada y azufrada aplicada durante todo el ciclo de cultivo en dos genotipos primaverales medios (seleccionados de los genotipos evaluados en el Capítulo 2) sobre la fisiología del rendimiento en grano en colza-canola, analizando sus efectos sobre: (i) los componentes numéricos, *i.e.* el peso y número de grano, (ii) la producción de biomasa aérea, y su partición de biomasa a raíz y a grano (IC), así como sus componentes fisiológicos (RFAint y EUR), y (iii) las distintas eficiencias de uso del N (EAUN, EFUN y EAN) ante distintas ofertas de S.

3.2. MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.1. Descripción de los experimentos

Durante tres años consecutivos (2006, 2007 y 2008) se condujeron ensayos en contenedores cilíndricos de 200 litros de capacidad (0,58 m de diámetro y 0,85 m de profundidad), en el campo experimental del Departamento de Producción Vegetal, Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires (34°35' S, 58°29' O). Con el objetivo de obtener un sustrato de baja oferta de nutrientes, los contenedores fueron rellenos con una mezcla homogénea de arena y tierra negra en una proporción de 3:1 (v/v) utilizándose todos los años el mismo sustrato con previa homogenización antes de cada siembra. Los contenedores fueron perforados en el fondo y en los 0,15 m inferiores fue agregado pedregullo de arcilla expandida para asegurar el drenaje de agua. Previo a la siembra en cada año, se extrajeron muestras de sustrato a 0-20 cm de profundidad para determinar la fertilidad inicial a través de análisis químicos que incluyeron nitrógeno total, nitratos y sulfatos (Tabla 3.1), con excepción de 2008 donde no se determinó el contenido inicial de nitratos y sulfatos, pero sí el nitrógeno total. En 2006 y 2007 los análisis fueron realizados en el Laboratorio Pergamino (S.P.A. 1853) mientras que en el 2008 fue realizado en el INGEIS (Instituto de Geocronología y Geología Isotópica, UBA-CONICET).

Tabla 3.1. Análisis químico del sustrato utilizado en los contenedores al inicio de cada ensayo en los años 2006, 2007 y 2008.

Análisis	Unidad	Método	2006	2007	2008
pH		Agua 1:2,5	6,6	6,1	6,7
Materia orgánica	%	Walkley y Black	0,48	0,70	0,51
Carbono	%	Walkley y Black	0,3	0,4	0,3
Fósforo Asimilable	Ppm	Bray y Kurtz	4,9	4	7,4
Nitrógeno Total	g/kg	Kejdhal	ND	ND	0,44
Nitratos	ppm	Fenoldisulf.	13	14	ND
Sulfatos	ppm	Sol. Morgan	3,6	5	ND

ND: Datos no disponibles

Se utilizaron dos genotipos comerciales de colza-canola, con similar duración del ciclo, ambos del grupo de primaverales medios (ver Capítulo 2): *Filial UofA* (variedad) y *Eclipse* (híbrido), suponiendo un diferencial de potencial genético a favor del híbrido. Los experimentos fueron sembrados el 09/08/2006, el 29/06/2007 y el 25/06/2008. En cada contenedor se sembraron a chorrillo 4 hileras de semillas de un cultivar determinado separadas a 0,15 m. Luego de la emergencia y cuando las plántulas tenían 2-3 hojas, se realizó un raleo manual con el objetivo de alcanzar una densidad objetivo de 200 (2006) y 100 (2007 y 2008) plantas m⁻². La mayor densidad del año 2006 se utilizó para compensar un menor crecimiento de las plantas debido al retraso en la fecha de siembra.

Se utilizaron cuatro tratamientos de fertilización de modo de combinar dos dosis contrastantes de N y S: N₀S₀, N₀S₁, N₁S₀ y N₁S₁, donde los subíndices 0 correspondieron a niveles de N y S disponibles mínimos para el crecimiento (47-67 kg N ha⁻¹ y 9,1-15,9 kg S ha⁻¹), mientras que los subíndices 1 correspondieron a niveles de N y S de 149-279 kg N ha⁻¹ y 60,0-69,4 kg S ha⁻¹, según el año del experimento (Tabla 3.2). Las dosis de N fueron crecientes entre años con el objetivo de explorar el mayor rango posible de disponibilidad de este nutriente. Los tratamientos (2 genotipos x 4

niveles de fertilización) se dispusieron en un diseño completamente aleatorizado (DCA) con tres repeticiones, y la unidad experimental fue el contenedor (24 contenedores en total en cada experimento), los que contenían microcanopeos de 0,264 m² de superficie.

Tabla 3.2. Cantidad (kg ha⁻¹) de N (N-nitratos y amonio) y S (S-sulfatos) disponibles para el cultivo en tratamientos N₀, N₁, S₀ y S₁ en los tres años de ensayo (2006, 2007 y 2008).

Año	N ₀	N ₁	S ₀	S ₁
2006	47	149	9,1	60,0
2007	48	201	15,9	69,4
2008	67	279	14,6	61,6

En 2006 se utilizaron cuatro soluciones nutritivas (N₀S₀, N₀S₁, N₁S₀ y N₁S₁) incluyendo macro y micro nutrientes e incorporadas al agua irrigada. Todas las soluciones contenían Cl₂Mg 867 µM, ZnCl₂ 228 µM, MnCl₂.4H₂O 664 µM, CuCl₂.2H₂O 86 µM, H₃BO₃ 118 µM, CoCl₂.6H₂O 12 µM, MoO₄Na₂.2H₂O 9 µM y FeCl₃.6H₂O 1547 µM como micro nutrientes. Para los tratamientos N₁, se incorporó en la solución NO₃NH₄ 2,6 mM como macro nutriente, y para los S₁, se agregó SO₄K₂ 6,4 mM. Para incluir K en los tratamientos S₀, también se adicionó ClK 2619 µM (Robson *et al.*, 1995). En los años 2007 y 2008 se prepararon dos soluciones nutritivas (N₀ y N₁) y el azufre se aplicó de forma sólida, como sulfato de calcio (yeso agrícola) en 2007, y sulfato de amonio en 2008, debido a la baja solubilidad de las sales azufradas. La composición de micro nutrientes fue igual al 2006, a excepción del Fe que se incorporó como EDTA-Fe 66 µM, por su mayor solubilidad. En los tratamientos N₁, además se incluyó NO₃NH₄ 4 y 5 mM como macro nutriente en 2007 y 2008, respectivamente. En los tres años el fósforo se aplicó en forma sólida como superfosfato triple, llevando el contenido de este elemento a 25 ppm en todos los tratamientos. También se incorporó urea (en todos los tratamientos en el 2006 y 2007, y en tratamientos S₀ en el 2008) y sulfato de amonio (en el año 2008 en los tratamientos S₁), de manera de llevar el contenido de N₀ de todos los tratamientos a 47, 48 y 67 kg N ha⁻¹ en los años 2006, 2007 y 2008, respectivamente. Esto se hizo con el objetivo de contar con un nivel mínimo de N suficiente para asegurar la supervivencia de las plantas y explorar rangos agronómicos de nutrientes, en contraste con trabajos fisiológicos que exploran niveles sumamente bajos de N incompatibles con la producción de cultivos. Las aplicaciones de fertilizantes sólidos se realizaron unos días después del raleo luego de alcanzada la densidad de plantas objetivo.

Para asegurar una aporte continuo de nutrientes a lo largo de todo el ciclo, las soluciones nutritivas fueron incorporadas cada tres días junto al agua de riego, desde el raleo hasta inicio de elongación del tallo (escala de Gómez y Miralles, 2006; equivalente al estado C2 de CETIOM; Arnoud, 1989), y posteriormente cada dos días hasta madurez. Así, la aplicación fraccionada en riegos frecuentes en un contenedor aislado permitió tener mayor control de la cantidad de nutrientes aplicados y lograr que estén disponibles a lo largo de todo el ciclo del cultivo. El contenido efectivo de N y S aportado cada año se calculó como la suma de la cantidad de ambos nutrientes incorporados en todos los riegos (Tabla 3.2). Además, se realizaron riegos complementarios con agua corriente de red a fin de evitar el estrés hídrico, pero siempre evitando un aporte excesivo de agua que generaría pérdidas de nutrientes por lixiviación. Se controlaron malezas manualmente, y plagas con *clorpirifós* 48 % para *Plutella xylostella* (0,10 L ha⁻¹) y *dimetoato* 40 % para pulgón (0,10 L ha⁻¹).

La información climática fue obtenida de una estación meteorológica situada a 20 metros del ensayo (Weather Monitor II, Davis, CA). En la Tabla 3.3 se muestran las temperaturas mínimas, máximas y medias (°C) y la radiación fotosintéticamente activa incidente acumulada en MJ m⁻² (RFAinc Ac= \sum radiación solar incidente x 0,48; Szeicz, 1974) para las etapas pre (desde emergencia hasta inicio de floración) y post floración (desde inicio de floración hasta madurez fisiológica) en los tres años de ensayo.

Tabla 3.3. Temperaturas mínimas, máximas y media (°C) y radiación fotosintéticamente activa incidente promedio (MJ m⁻²) en las etapas pre y postfloración en tres años (2006, 2007 y 2008).

	2006		2007		2008	
	Pre-Fl. ¹	Post-Fl. ²	Pre-Fl.	Post-Fl.	Pre-Fl.	Post-Fl.
Temp. Min. (°C)	11,5	15,1	8,2	13,5	9,6	14,2
Temp. Max. (°C)	21,4	24,9	16,5	23,1	18,2	24,5
Temp. Med. (°C)	16,4	20,0	12,3	18,3	13,9	19,4
RFAinc Prom (MJ m ⁻²)	8,1	11,1	4,8	9,0	4,2	9,4

¹Pre-Fl.: desde E hasta IFl. ²Post-Fl.: desde IFl hasta MF.

3.2.2. Mediciones

Fenología y dinámica de aparición de órganos reproductivos

Durante todo el ciclo del cultivo se registraron los distintos estados ontogénicos, a fin de caracterizar la fenología de ambos genotipos siguiendo la escala de Gómez y Miralles (2006). Se consideró que se alcanzó un estado particular cuando el 50 % de las plantas del contenedor estaban en dicho estado (Tabla 3.4). En el año 2006 no se determinó la ocurrencia de inicio de fructificación, y MF fue estimada a partir de los datos de los años 2007 y 2008 (ver sección 4.2.2 del siguiente capítulo).

Tabla 3.4. Descripción de los estado ontogénicos del cultivo de colza de acuerdo a la escala de CETIOM (Arnoud, 1989) y aquella modificada por Gómez y Miralles (2006).

CETIOM	Gómez y Miralles, 2006	Estado	Descripción
A	E	Estado cotiledonar	Cotiledones desplegados
B6	R	Roseta	Roseta con 6 hojas
C2	IElg	Inicio de elongación del tallo	Entrenudos visibles
D1	BFV	Inflorescencia visible	Pimpollos encerrados por últimas hojas
F1	IFl	Inicio de floración	Una flor abierta en tallo principal
G2	IFr	Inicio de fructificación	Primeras 10 silicuas de 2 a 4cm
G4	MF	Madurez fisiológica	Peso constante del grano*

* Los ajustes a las relaciones peso seco del grano/tiempo se muestran en la sección 4.2.2 del siguiente capítulo.

La duración de las diferentes etapas fenológicas se calculó en días y en tiempo térmico (TT), utilizando una temperatura base de 0 °C (Mendham y Salisbury, 1995). En cada contenedor, se identificaron tres plantas de similar fenología sobre las que se realizaron mediciones más detalladas de la aparición de órganos reproductivos, registrando los momentos de aparición de las flores en el tallo principal y el número de

silicuas fértiles (con al menos 1 grano lleno a cosecha) en tallo principal y ramas. El seguimiento de la tasa de aparición de las flores consistió en registrar el número de flores abiertas por día en el tallo principal. Con el número total de flores abiertas y el número de silicuas fértiles se estimó la proporción de cuaje en el tallo principal, según la siguiente ecuación: $\text{Cuaje} = \text{NSF} / \text{NFA}$, donde **NSF** es el número de silicuas fértiles a cosecha (silicuas con más de un grano lleno), y **NFA** es el número de flores abiertas. Ambos parámetros medidos en el tallo principal de la planta. La aparición de flores en el tiempo (días desde inicio de floración) se ajustó a un modelo bi-lineal, utilizando la siguiente ecuación: $\text{NF} = a + bx \ (x \leq c) + bc \ (x > c)$, donde **NF** es el número de flores, “**a**” es la ordenada en origen, “**b**” es la tasa de aparición de flores (flores día⁻¹), “**c**” es el momento de finalización de la aparición de flores (día desde inicio de floración que se alcanza el máximo número de flores) y “**x**” son los días desde inicio de floración.

Biomasa, rendimiento y componentes

A madurez del cultivo (determinada por el cambio a color marrón de silicuas y tallos) se determinó la biomasa seca aérea total (BAT) y el rendimiento en grano del cultivo. Para ello se cosecharon plantas del microcanopeo de toda la superficie de cada contenedor (2006) o plantas de 0,40 m lineales de los dos surcos centrales de cada contenedor (2007 y 2008) colocando el material en estufa de secado a 60 °C hasta peso constante. En 2007 y 2008 se registró la biomasa de tallos (BT) y de silicuas (BS), mientras que en 2006 la BS, fue estimada con los datos de 2007 y 2008, promediando la proporción de BT correspondiente a BS para cada tratamiento. En la BAT y BT no se incluyeron las hojas que senescieron durante el ciclo pero sí aquellas que a madurez del cultivo estaban adheridas al tallo. En 2007 y 2008 se extrajeron las raíces de plantas de 0,20 m lineales de las dos hileras centrales de cada contenedor (5-6 plantas por contenedor). Las mismas se extrajeron haciendo excavaciones en el sustrato del contenedor, de manera de poder retirar las raíces junto con el pan de tierra adyacente (ver fotos en Anexo 2). Luego se lavaron, se separaron las raíces secundarias de la principal y se colocaron en estufa a 60 °C. De cada planta individual se estimó la biomasa seca de raíces principales (BRP), de raíces secundarias (BRS) y la biomasa seca radical total (BRT = BRP + BRS). Se estableció la relación entre la BRT y la BAT por planta, cuya pendiente permitió estimar un índice de partición a raíz.

Los componentes del rendimiento medidos fueron el número de silicuas por unidad de superficie (NS) y el peso de mil granos (PG), este último se estimó a partir del conteo de 400 granos de cada muestra. Con estas determinaciones se estimó el número de granos por unidad de superficie (NG) y el número de granos por silicua (NGS). El índice de cosecha de grano (IC) se calculó como la relación entre el rendimiento en grano y la BAT para cada tratamiento. También se asoció el rendimiento con sus componentes: NG, PG, NS y NGS para determinar que componente explicó mejor los cambios en el rendimiento.

Durante el ciclo del cultivo se evaluó la dinámica de intercepción de la radiación, midiendo semanalmente la radiación incidente y transmitida con un radiómetro lineal LI-COR (LI-COR Inc. Lincoln NE, USA) al mediodía (entre las 12 y 14 hs) en días despejados. El porcentaje de radiación interceptada (RI) fue calculado según la siguiente ecuación: $\text{RI} (\%) = 100 \times (1 - I/I_0)$, donde, “**I**” es la radiación incidente y transmitida a nivel del suelo (promedio de mediciones en 3 lugares del entresurco central) e “**I₀**” es la radiación incidente medida sobre el canopeo del cultivo. Para estimar el porcentaje de radiación interceptada a escala diaria (RI_d), se ajustaron los valores medidos en cada parcela en función de los días desde emergencia hasta madurez fisiológica (MF), utilizando un modelo logístico, como lo indica la siguiente ecuación:

$RI_d (\%) = RI\%_{max} [1 + \exp(-b(x - c))]^{-1}$, donde **RI%_{max}** es el valor máximo de radiación, “**b**” es la tasa relativa de cambio del porcentaje de radiación interceptada, “**c**” indica el momento en que ocurre el máximo valor de la pendiente y “**x**” es el tiempo (en días desde emergencia). La radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFA_{int} en $MJ\ m^{-2}\ día^{-1}$) para cada día se estimó como el producto de la $RI_d (\%)$ y la RFA incidente en $MJ\ m^{-2}\ día^{-1}$ (asumiendo que RFA incidente = radiación solar incidente diaria x 0,48; Szeicz, 1974). La BAT fue corregida (BAT_c) por el costo de síntesis del aceite e hidratos de carbono según Penning de Vries (1983), utilizando la siguiente ecuación: $BAT_c = (Resto\ BAT + Resto\ Rend) \times 1,29 + (Ac \times 3,106)$, donde **BAT_c** es la biomasa aérea total corregida ($g\ glucosa\ m^{-2}$), **Resto BAT** es la biomasa aérea que no es grano ($g\ m^{-2}$), **Resto Rend** es la biomasa de grano que no es aceite ($g\ m^{-2}$), “**1,29**” es el factor de conversión que contempla el % de lípidos en la biomasa que no es grano (0,025 %), el costo de síntesis de lípidos ($3,106\ g\ glucosa\ g\ lípido^{-1}$) y el costo de síntesis de los hidratos de carbono ($1,242\ g\ glucosa\ g\ hidrato\ de\ carbono^{-1}$), **Ac** es el rendimiento en aceite en $g\ m^{-2}$ (más detalle del rendimiento en aceite en la sección 4.2.2 del siguiente capítulo) y “**3,106**” nuevamente es el costo de síntesis de lípidos. La eficiencia de uso de la radiación (EUR en $g\ MJ^{-1}$) o la EUR corregida (EUR_c en $g\ glucosa\ MJ^{-1}$) se estimó a partir de la relación entre BAT o BAT_c a cosecha y la RFA interceptada acumulada (RFA_{int} Ac) desde E a MF en cada tratamiento.

Eficiencia de uso del nitrógeno

El análisis de la eficiencia en el uso del nitrógeno se basó en la relación entre el rendimiento en grano, la absorción de nitrógeno y el nitrógeno disponible durante el ciclo (De Wit, 1953). Para estimar el N absorbido por el cultivo, primero se determinó la concentración de N en el grano a través de una digestión sulfúrica con el método micro-Kjeldahl (más detalle del método en sección 4.2.2 del siguiente capítulo). Luego se afectó este valor por el rendimiento y el índice de cosecha de N (ICN), asumiendo un valor de 0,76 (Hocking *et al.*, 1997) para obtener los kg de N ha^{-1} absorbidos por el cultivo. El N disponible fue el aplicado en la fertilización de base (N₀) y con las soluciones (N₁) en cada año, según muestra la Tabla 3.2, asumiendo pérdidas x lavado y volatilización despreciables.

Se determinaron tres eficiencias: (i) la eficiencia agronómica del uso del nitrógeno (EAUN = $kg\ de\ grano\ kg\ N\ disponible^{-1}$) estimada como la pendiente (en la porción lineal) de la relación entre el rendimiento y el nitrógeno disponible (suelo + aplicado); (ii) la eficiencia fisiológica del uso del nitrógeno (EFUN = $kg\ grano\ kg\ N\ absorbido^{-1}$) que surgió de la relación entre el rendimiento y la cantidad de nitrógeno absorbido (en la porción lineal); y (iii) la eficiencia de absorción del N disponible (EAN = $kg\ N\ absorbido\ kg\ N\ disponible^{-1}$) estimada como la pendiente de la relación entre nitrógeno absorbido y el nitrógeno disponible por el cultivo. Se calculó el Diferencial de N como la diferencia entre el N absorbido por el cultivo en cada tratamiento y el N disponible, y se asoció la EAUN y el Diferencial de N con el N disponible del suelo. Los aportes de N y S por mineralización se estimaron a partir del contenido inicial de materia orgánica (MO) del suelo (0-60 cm de profundidad), asumiendo un contenido de C en MO de 0,58 (Schulte y Hopkins, 1996), una relación C:N de 11 (Álvarez y Steinbach, 2006) y una tasa de mineralización del N de la MO de 1,6 %, ya que se tomó la tasa propuesta por Álvarez (1999) de 0,8% (para los primeros 30 cm en el período siembra-floración en cultivos de trigo en la localidad de Pergamino) multiplicada por 2 para considerar una profundidad de 60 cm. Si bien esta tasa de mineralización no se corresponde con el tipo de suelo usado en los contenedores esta tesis la disponibilidad de este tipo de información es muy escasa por lo que se decidió

utilizar el valor mencionado. Los kg N ha^{-1} aportados por mineralización de la MO cada año se promediaron para obtener una estimación anual única. Similar cálculo se aplicó para estimar el aporte de S por mineralización asumiendo una relación C:S de 70 (Galantini *et al.*, 2004).

3.2.3. Análisis estadísticos

Para determinar el efecto de los tratamientos sobre los atributos del cultivo se realizaron análisis de varianza (ANVA), incluyendo como factores el genotipo, los tratamientos de N y S y las interacciones. Dado que los niveles de fertilización fueron diferentes (crecientes) entre años, se decidió no realizar los análisis estadísticos incluyendo los tres años. Por este motivo, se hicieron análisis de varianza para cada año por separado para analizar las diferencias entre tratamientos de fertilización y genotipos. En aquellos casos donde se observaron efectos significativos de los tratamientos, el nivel de significancia entre las medias se comparó usando el test de Diferencias Mínimas Significativas (LSD, $\alpha = 0,05$). Se ajustaron regresiones lineales simples a las relaciones entre componentes de biomasa/rendimiento y rendimiento/contenido de nitrógeno, con el fin de estimar coeficientes de partición y eficiencias, respectivamente. Además se ajustaron funciones lineales o bi-lineales, según corresponda, para establecer el grado de correlación entre variables y/o caracterizar la dinámica de aparición de distintos órganos.

3.3. RESULTADOS

3.3.1. Fenología

Tal como se esperaba, en función de lo observado en el Capítulo anterior, la fenología de ambos genotipos fue muy similar variando ligeramente entre años (Tabla 3.5). La distinta disponibilidad de N como de S (datos no mostrados) no generaron grandes cambios en el desarrollo del cultivo. Sólo hubo efecto del N en la duración de la etapa inicio de elongación del tallo-botón floral visible (IElg-BFV) en los años 2006 y 2008, donde la mayor disponibilidad de N acortó la etapa en un 36 y 38 % en el año 2006 y en un 31 y 17 % en el año 2008, para *Filial UofA* y *Eclipse*, respectivamente. En dicha etapa se inicia el crecimiento del tallo, y el momento de ocurrencia del BFV esta fuertemente influenciado por la disponibilidad de recursos, por lo tanto este acortamiento de la etapa provocado por el N parecería ser más un efecto sobre el crecimiento que sobre el desarrollo del cultivo. De cualquier manera, este acortamiento en esta etapa fue contrarrestado en las siguientes, ya que después de BFV las etapas siguientes se alargaron a mayor oferta de N, de manera de finalizar el ciclo a MF con una duración igual para los tratamientos de N_0 y N_1 .

Tabla 3.5. Duración de las etapas siembra-emergencia (Sbr-E), emergencia-roseta (E-R), roseta-inicio de elongación del tallo (R-IElg), inicio de elongación del tallo-botón floral visible (IElg-BFV), botón floral visible-inicio de floración (BFV-IFl), inicio de floración-inicio de fructificación (IFl-IFr), inicio de fructificación-madurez fisiológica (IFr-MF) y del ciclo total (E-MF) en tiempo térmico ($t_{base}= 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) y días para dos genotipos (*Filial UofA* y *Eclipse*) y dos tratamientos de fertilización (N_0 y N_1) en los tres años (2006, 2007 y 2008).

Tratamiento	Sbr-E	E-R	R-IElg	IElg-BFV	BFV-IFl	IFl-IFr	IFr-MF	E-MF °Cd	E-MF días
2006									
<i>Filial UofA</i> N_0	189,0	368,7	289,0	260,7	179,8	679,8*		1778	101
<i>Filial UofA</i> N_1	189,0	368,7	289,0	167,7	217,0	735,7*		1778	101
<i>Eclipse</i> N_0	151,9	365,6	263,7	402,3	212,6	658,0*		1902	107
<i>Eclipse</i> N_1	151,9	365,6	263,7	250,9	273,5	748,5*		1902	107
2007									
<i>Filial UofA</i> N_0	132,3	312,7	298,0	117,6	278,9	136,6	527,0	1671	117
<i>Filial UofA</i> N_1	132,3	312,7	298,0	117,6	278,9	110,0	553,6	1671	117
<i>Eclipse</i> N_0	124,5	314,3	236,6	123,9	281,5	110,3	593,8	1660	117
<i>Eclipse</i> N_1	124,5	314,3	236,6	123,9	281,5	110,3	593,8	1660	117
2008									
<i>Filial UofA</i> N_0	113,6	354,0	500,4	152,8	232,2	143,7	593,2	1976	127
<i>Filial UofA</i> N_1	113,6	354,0	500,4	105,7	248,6	144,5	623,1	1976	127
<i>Eclipse</i> N_0	113,6	354,0	429,2	212,2	278,2	153,3	576,2	2003	128
<i>Eclipse</i> N_1	113,6	354,0	429,2	176,9	279,3	113,8	650,0	2003	128

* Corresponden a duraciones de la etapa IFl-MF ya que no se determinó la ocurrencia de IFr.

3.3.2. Producción de biomasa y sus componentes fisiológicos

En los tres años analizados se observó una tendencia general al aumento de la biomasa aérea total (BAT) ante mayores disponibilidades de nitrógeno, sin efectos del agregado de azufre en forma aislada ni al combinarlo con nitrógeno (Figura 3.1; ver mayores detalles en Anexo 3). Los niveles de fertilizantes aplicados fueron crecientes en los 3 años (Tabla 3.2) y en el año 2008 el cultivo tuvo la mayor respuesta de la BAT al agregado de N, con incrementos del 56 y 80 %, mientras que los mismos fueron del 17 y 31 % para el 2006 y del 35 y 27 % para el 2007, para *Filial UofA* y *Eclipse*, respectivamente. No existieron diferencias significativas entre genotipos en la producción de biomasa aérea total ni en la respuesta a la fertilización.

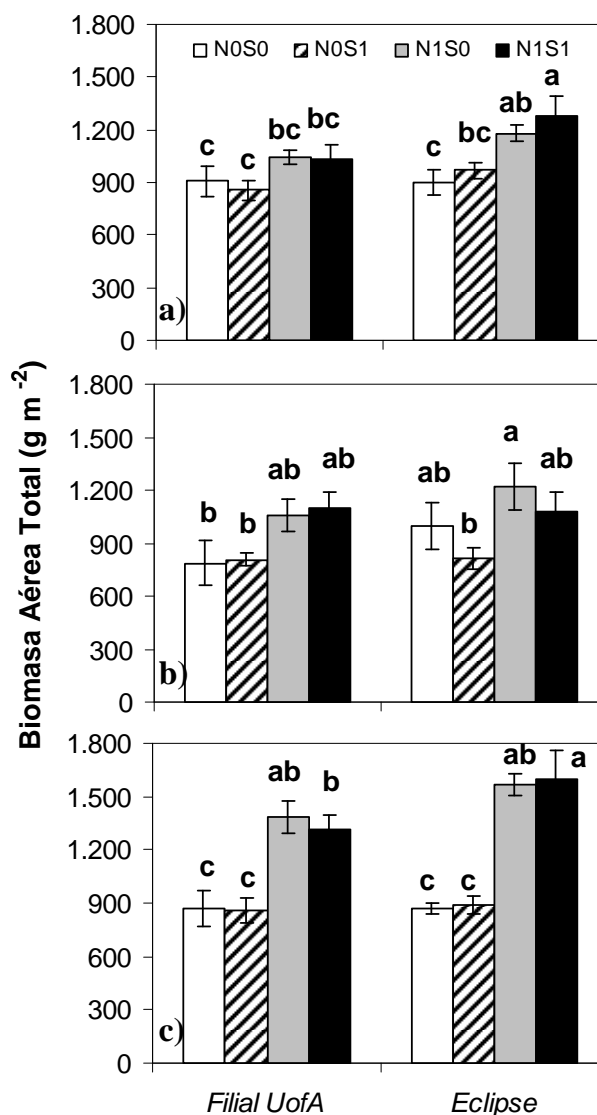


Fig. 3.1. Biomasa aérea total (g m^{-2}) para los tratamientos de fertilización en dos genotipos (Filial UofA y Eclipse) durante tres años: a) 2006, b) 2007 y c) 2008. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos y genotipos dentro de cada año ($p < 0,05$). Las barras de error muestran el error estándar. Los códigos de los tratamientos y las dosis de fertilizante aplicados en cada año están descriptos en la Tabla 3.2.

La mayoría de los componentes de la biomasa total respondieron positivamente al incremento en la disponibilidad de N en los tres años, mientras que el S nunca generó diferencias significativas (Tabla 3.6). A excepción de la biomasa radical total (BRT) y de raíces principales (BRP) en el año 2007, y la relación raíz:tallo en los dos años, el resto de los componentes fueron significativamente mayores ($p < 0,05$) en los tratamientos N₁ respecto del N₀ en los tres años de ensayo, siendo la biomasa de raíces secundarias (BRS) el componente que mayores cambios experimentó (ca. 124 y 90 % de aumento de BRS al agregado de N para el 2007 y 2008, respectivamente). En el año 2008 se obtuvo la mayor respuesta al N, con incrementos de la biomasa de 48-78 %, 60-81 %, 41-53 %, 32-45 % y 85-96 % para tallos (BT), silicuas (BS), BRT, BRP y BRS en Filial UofA y Eclipse, respectivamente. En algunas variables se manifestaron diferencias entre genotipos, principalmente en año 2008 cuando hubo un mayor nivel de

fertilización nitrogenada (BT en 2006 y 2008, BS en 2008, BRT en 2008 y raíz:tallo en 2008).

Al momento de cosecha, la mayor proporción de la biomasa total (biomasa aérea y radical) correspondió a la biomasa de tallos (*ca.* 41 y 37 % para los años 2007 y 2008, respectivamente) en ambos genotipos. Las silicuas representaron un 20 % de la biomasa total en ambos años y genotipos, mientras que las raíces representaron el 12 y 16 % de la biomasa total en el 2007 y 2008, respectivamente. Dentro de la BRT, el 90 y 81 % de la biomasa correspondió a la BRP en el 2007 y 2008, respectivamente. El agregado de N sólo generó cambios en la partición de biomasa entre raíces principales y secundarias en ambos años. Así, del total de las raíces generadas por el cultivo, la proporción correspondiente a la BRP se redujo en el tratamiento N_1 , pasando del 88 (N_0) al 83 % (N_1) de la BRT, mientras que la BRS aumentó del 11 (N_0) al 17 % (N_1) como promedio de ambos años, respectivamente (Tabla 3.6, Figura 3.2).

Tabla 3.6. Biomasa de tallos (BT), biomasa de silicuas (BS), biomasa de raíces total (BRT), biomasa de raíces principales (BRP), biomasa de raíces secundarias (BRS) y relación raíz:tallo para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (Filial UofA y Eclipse) en los tres años (2006, 2007 y 2008). Los códigos de los tratamientos y las dosis de fertilizante aplicados en cada año están descriptos en la Tabla 3.2.

Año	Trata- miento	BT (g m ⁻²)	BS ¹ (g m ⁻²)	BRT (g m ⁻²)	BRP (g m ⁻²)	BRS (g m ⁻²)	raíz: tallo
2006		<i>Filial UofA</i>					
	N ₀ S ₀	410,1 c	212,0 ab	-	-	-	-
	N ₀ S ₁	401,7 c	186,0 b	-	-	-	-
	N ₁ S ₀	490,6 b	221,8 ab	-	-	-	-
	N ₁ S ₁	469,8 bc	226,0 ab	-	-	-	-
		<i>Eclipse</i>					
	N ₀ S ₀	498,4 b	182,7 b	-	-	-	-
	N ₀ S ₁	533,7 b	197,7 b	-	-	-	-
	N ₁ S ₀	626,0 a	244,2 ab	-	-	-	-
	N ₁ S ₁	676,6 a	272,9 a	-	-	-	-
Nitrógeno (N)		***	**				
Azufre (S)		NS	NS				
Genotipo (G)		***	NS				
	NxS	NS	NS				
	NxG	NS	NS				
	SxG	NS	NS				
	NxSxG	NS	NS				
2007		<i>Filial UofA</i>					
	N ₀ S ₀	368,0 c	169,1 b	107,5 ab	98,0 a	9,5 bc	0,29 a
	N ₀ S ₁	355,7 c	174,7 b	104,9 b	95,9 a	8,9 bc	0,29 a
	N ₁ S ₀	459,3 abc	255,5 ab	115,3 ab	97,8 a	17,5 a	0,25 a
	N ₁ S ₁	524,2 ab	215,6 ab	167,7 a	147,8 a	20,0 a	0,32 a
		<i>Eclipse</i>					
	N ₀ S ₀	465,8 abc	231,9 ab	140,8 ab	133,5 a	7,3 bc	0,30 a
	N ₀ S ₁	385,8 bc	187,5 ab	112,8 ab	107,4 a	5,4 c	0,29 a
	N ₁ S ₀	561,7 a	270,6 a	147,1 ab	130,0 a	17,1 a	0,26 a
	N ₁ S ₁	499,5 abc	241,2 ab	115,9 ab	102,0 a	13,9 ab	0,23 a
Nitrógeno (N)		**	*	NS	NS	***	NS
Azufre (S)		NS	NS	NS	NS	NS	NS
Genotipo (G)		NS	NS	NS	NS	NS	NS
	NxS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	NxG	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	SxG	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	NxSxG	NS	NS	NS	NS	NS	NS
2008		<i>Filial UofA</i>					
	N ₀ S ₀	368,6 c	215,1 c	180,1 cd	147,8 bc	32,3 c	0,49 abc
	N ₀ S ₁	382,1 c	200,1 c	219,5 bcd	185,6 abc	34,0 c	0,57 a
	N ₁ S ₀	588,9 b	336,9 ab	309,1 a	232,5 a	76,6 a	0,52 ab
	N ₁ S ₁	519,6 b	328,7 b	254,0 abc	208,1 ab	45,9 bc	0,49 abcd
		<i>Eclipse</i>					
	N ₀ S ₀	396,1 c	216,8 c	146,1 d	120,8 c	25,3 c	0,37 cde
	N ₀ S ₁	408,6 c	223,7 c	168,3 d	143,6 bc	24,6 c	0,41 bcde
	N ₁ S ₀	719,6 a	392,8 ab	216,8 bcd	178,8 abc	38,0 bc	0,30 e
	N ₁ S ₁	714,6 a	405,4 a	263,9 ab	204,1 ab	59,7 ab	0,37 de
Nitrógeno (N)		***	***	***	**	***	NS
Azufre (S)		NS	NS	NS	NS	NS	NS
Genotipo (G)		**	*	*	NS	NS	***
	NxS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	NxG	*	NS	NS	NS	NS	NS
	SxG	NS	NS	NS	NS	*	NS
	NxSxG	NS	NS	NS	NS	*	NS

Nota: Letras distintas indican diferencias entre tratamientos de fertilización y genotipos dentro de cada año ($p < 0,05$). *, **, *** corresponden a $p < 0,05$; 0,01 y 0,001; respectivamente. NS: no significativo.

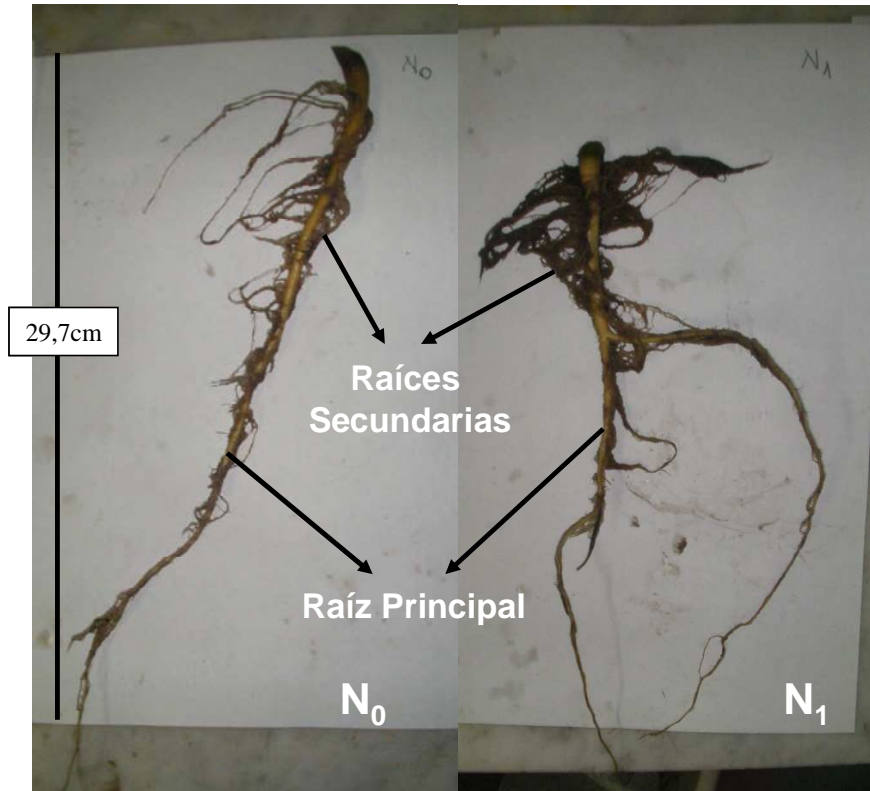


Fig. 3.2. Fotos de raíces de colza-canola. A la izquierda se observa una raíz del tratamiento N_0 y a la derecha del tratamiento N_1 .

La mayor oferta de N tendió a reducir la relación raíz:tallo, aunque no se hallaron diferencias significativas entre tratamientos de N y S (Tabla 3.6). La relación fue algo variable entre años, con mayores valores en 2008 y diferencias significativas entre genotipos ese año, con valores levemente menores en *Eclipse* (0,52 vs. 0,36, para *Filial UofA* vs. *Eclipse* en el 2007 y 2008, respectivamente). La proporción de la biomasa aérea total que derivó a raíz fue muy estable entre genotipos y entre tratamientos de N y S, por lo cual se analizaron en conjunto todos los tratamientos (Figura 3.3), aunque en el año 2007 hubo diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las pendientes para los tratamientos N_0 y N_1 , en términos agronómicos dicho incremento fue de poca significación. En el 2007, la partición de biomasa total a raíz fue del 15 % y tuvo un valor significativamente superior en el 2008 (19 %), con un menor ajuste de la regresión, en parte explicado por la mayor dispersión de los tratamientos N_1 , y algún ordenamiento según el genotipo, ya que los valores de *Filial UofA* (círculos) se ubican mayoritariamente arriba en la regresión y los de *Eclipse* (triángulos) hacia abajo.

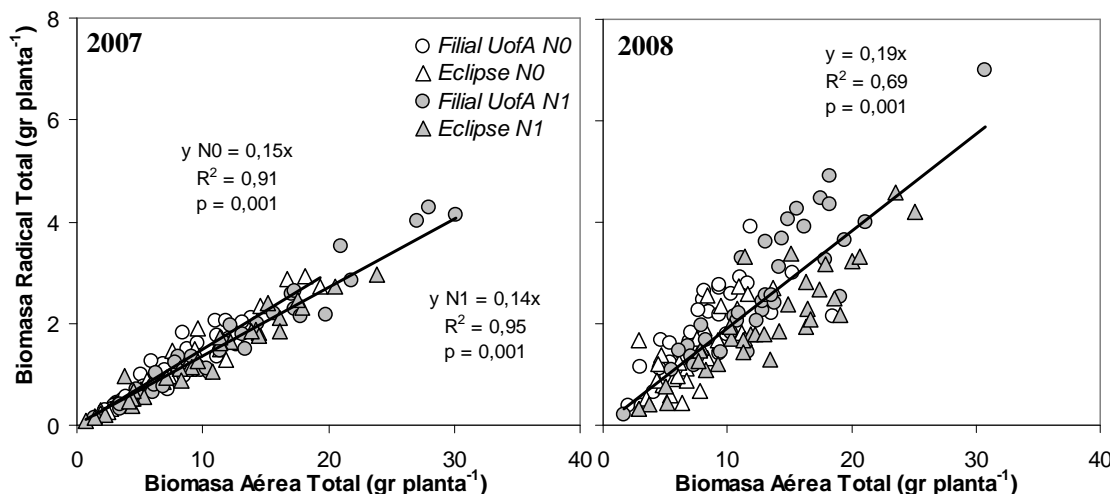


Fig. 3.3. Relación entre la biomasa radical total (g planta^{-1}) y la biomasa aérea total (g planta^{-1}), ambas medidas a cosecha del cultivo, para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (círculos: Filial UofA y triángulos: Eclipse) en dos años (2007 y 2008). Se muestran ajustes lineales a los datos (forzados a 0). Los símbolos vacíos corresponden a los tratamientos N_0 y los grises a los N_1 . Cada punto corresponde a una planta individual (5-6 por contenedor). Se incluyeron también los tratamientos con S.

Los componentes fisiológicos de la biomasa (radiación interceptada y eficiencia en el uso de la radiación) respondieron significativamente a la fertilización nitrogenada, a excepción de la EURc en el año 2006 que no manifestó cambios (Tabla 3.7). La RFAint Ac, EUR y EURc aumentaron cuando se fertilizó con nitrógeno, con una mayor respuesta en el año de mayor nivel de fertilización (2008). Ese mismo año, se observó interacción $N \times G$ en la EUR y EURc, explicada por una clara respuesta a la fertilización nitrogenada en *Eclipse* (con mayores valores en los tratamientos N_1), mientras que en *Filial UofA* hubo una menor respuesta. El azufre tampoco modificó los componentes fisiológicos de la biomasa, aunque hubo interacciones dobles $N \times S$ y $S \times G$ en la RFAint Ac en el año 2008. Los valores corregidos de EUR fueron un 49 a 59 % mayores que sin corregir por los costos de síntesis.

Tabla 3.7. Radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada desde E a MF en MJ m^{-2} (RFAint Ac), eficiencia en el uso de la radiación en g MJ^{-1} (EUR) y EUR corregida en g glucosa MJ^{-1} (EURc) para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (Filial UofA y Eclipse) en los tres años (2006, 2007 y 2008). Los códigos de los tratamientos y las dosis de fertilizante aplicados en cada año están descriptos en la Tabla 3.2.

Año	Trata- miento	RFAint Ac (MJ m^{-2})	EUR (g MJ^{-1})	EURc (g glu MJ^{-1})
2006	<i>Filial UofA</i>			
	N_0S_0	519,6 cd	1,75 ab	2,74 a
	N_0S_1	517,4 d	1,66 ab	2,59 a
	N_1S_0	578,2 bc	1,81 ab	2,81 a
	N_1S_1	574,7 bcd	1,79 ab	2,78 a
	<i>Eclipse</i>			
	N_0S_0	571,2 bcd	1,59 b	2,40 a
	N_0S_1	618,7 ab	1,57 b	2,37 a
	N_1S_0	662,1 a	1,78 ab	2,70 a
	N_1S_1	645,7 a	1,97 a	2,97 a
	Nitrógeno (N)	***	*	NS
	Azufre (S)	NS	NS	NS
	Genotipo (G)	***	NS	NS
	NxS	NS	NS	NS
	NxG	NS	NS	NS
	SxG	NS	NS	NS
	NxSxG	NS	NS	NS
2007	<i>Filial UofA</i>			
	N_0S_0	368,1 cd	2,11 b	3,29 b
	N_0S_1	356,1 d	2,27 ab	3,60 ab
	N_1S_0	391,5 abc	2,56 ab	4,00 ab
	N_1S_1	390,3 abc	2,82 ab	4,40 ab
	<i>Eclipse</i>			
	N_0S_0	386,1 abcd	2,58 ab	4,00 ab
	N_0S_1	372,6 bcd	2,18 b	3,38 b
	N_1S_0	404,8 a	3,02 a	4,70 a
	N_1S_1	399,6 ab	2,70 ab	4,18 ab
	Nitrógeno (N)	**	*	*
	Azufre (S)	NS	NS	NS
	Genotipo (G)	NS	NS	NS
	NxS	NS	NS	NS
	NxG	NS	NS	NS
	SxG	NS	NS	NS
	NxSxG	NS	NS	NS
2008	<i>Filial UofA</i>			
	N_0S_0	406,3 d	2,14 bc	3,34 bc
	N_0S_1	488,3 c	1,75 cd	2,72 cd
	N_1S_0	523,1 bc	2,65 a	4,12 a
	N_1S_1	535,6 ab	2,46 ab	3,88 ab
	<i>Eclipse</i>			
	N_0S_0	523,0 bc	1,67 d	2,57 d
	N_0S_1	536,3 ab	1,66 d	2,56 d
	N_1S_0	571,7 a	2,74 a	4,17 a
	N_1S_1	560,1 ab	2,85 a	4,34 a
	Nitrógeno (N)	***	***	***
	Azufre (S)	*	NS	NS
	Genotipo (G)	***	NS	NS
	NxS	*	NS	NS
	NxG	*	*	*
	SxG	*	NS	NS
	NxSxG	NS	NS	NS

Nota: Letras distintas indican diferencias entre tratamientos de fertilización y genotipos dentro de cada año ($p < 0,05$). *, **, *** corresponden a $p < 0,05$; 0,01 y 0,001; respectivamente. NS: no significativo.

3.3.3. Rendimiento en grano y sus componentes numéricos

El rendimiento en grano aumentó significativamente ($p < 0,05$) con el agregado de N en los tres años evaluados, sin hallarse diferencias entre tratamientos de S ni entre genotipos (Figura 3.4; más detalle en Anexo 4). La mayor respuesta a la fertilización nitrogenada se observó en el año 2008 donde los niveles de N aplicados fueron más altos (Tabla 3.2), con aumentos del rendimiento respecto del control (N_0) del 73% en promedio para ambos genotipos.

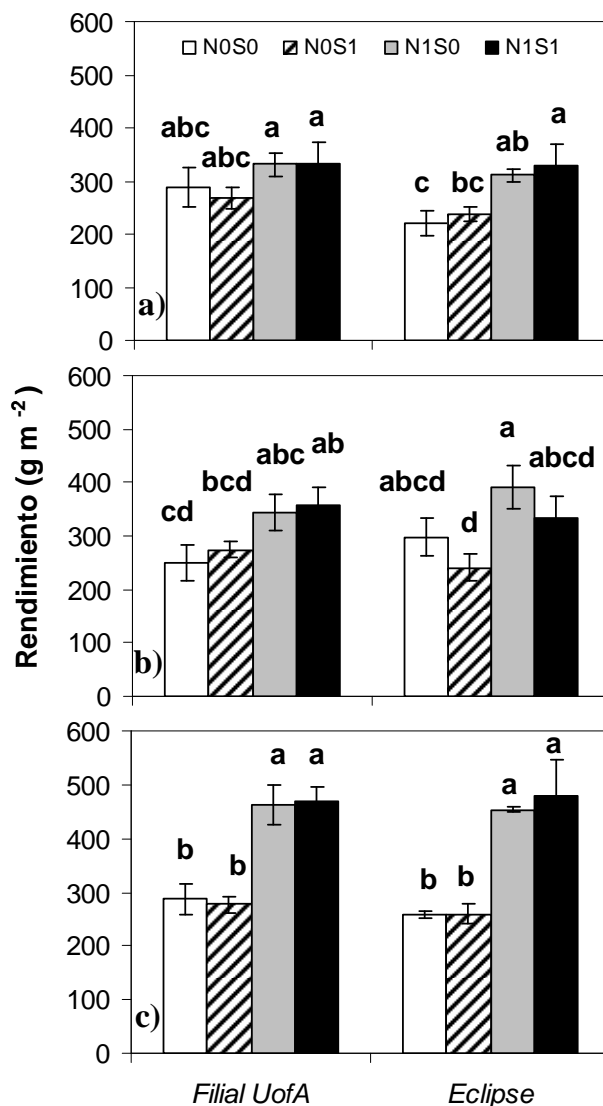


Fig. 3.4. Rendimiento en grano en peso seco ($g\ m^{-2}$) para todos los tratamientos de fertilización en dos genotipos (Filial UofA y Eclipse) durante tres años: a) 2006, b) 2007 y c) 2008. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos y genotipos dentro de cada año ($p < 0,05$). Las barras de error muestran el error estándar. Los códigos de los tratamientos y las dosis de fertilizante aplicados en cada año están descriptos en la Tabla 3.2.

En los tres años de ensayos, el aumento de la disponibilidad de N no generó cambios significativos en el número de granos por silicuas (NGS), en el peso del grano (PG), ni en el índice de cosecha (IC), pero incrementó significativamente el número de silicuas (NS) y el número total de granos por m^2 (NG) (Tabla 3.8). Considerando los promedios de ambos genotipos y tratamientos de S, el NS se incrementó en un 27, 32 y 71 %, mientras que el NG lo hizo en un 24, 38 y 77 % para el 2006, 2007 y 2008,

respectivamente al pasar de N_0 a N_1 . Para algunas variables y años existieron diferencias genotípicas. En los tres años *Filial UofA* se caracterizó por tener significativamente más NGS (19 vs. 16 granos silicua⁻¹) e IC (0,33 vs. 0,28) que *Eclipse*. Para ningún componente del rendimiento hubo un efecto significativo ($p < 0,05$) del S ni interacciones con los demás factores estudiados (Tabla 3.8).

Tabla 3.8. Número de silicuas por m² (NS), número de granos por silicua (NGS), número de granos por m² (NG), peso de mil granos (PG) e índice de cosecha (IC) para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (Filial UofA y Eclipse) en los tres años (2006, 2007 y 2008). Los códigos de los tratamientos y las dosis de fertilizante aplicados en cada año están descriptos en la Tabla 3.2.

Año	Trata- miento	NS (silicuas m ²)	NGS (granos silicua ⁻¹)	NG (granos m ²)	PG (g)	IC
2006						
<i>Filial UofA</i>						
	N ₀ S ₀	5.737 ab	20 a	114.832 ab	2,51 c	0,31 a
	N ₀ S ₁	5.406 b	18 b	94.548 bc	2,82 abc	0,31 a
	N ₁ S ₀	6.790 a	18 b	124.415 a	2,67 bc	0,32 a
	N ₁ S ₁	6.803 a	18 b	124.864 a	2,66 bc	0,32 a
<i>Eclipse</i>						
	N ₀ S ₀	5.141 b	16 c	81.137 c	2,70 abc	0,24 b
	N ₀ S ₁	5.218 b	16 c	82.562 c	2,87 ab	0,24 b
	N ₁ S ₀	6.791 a	15 c	103.124 abc	3,01 a	0,26 b
	N ₁ S ₁	6.918 a	16 c	109.530 ab	2,97 ab	0,25 b
	Nitrógeno (N)	***	NS	**	NS	NS
	Azufre (S)	NS	NS	NS	NS	NS
	Genotipo (G)	NS	***	**	*	***
	NxS	NS	*	NS	NS	NS
	NxG	NS	NS	NS	NS	NS
	SxG	NS	*	NS	NS	NS
	NxSxG	NS	NS	NS	NS	NS
2007						
<i>Filial UofA</i>						
	N ₀ S ₀	4.475 d	18 b	81.121 d	3,05 bc	0,32 bcd
	N ₀ S ₁	4.531 d	20 a	90.707 bcd	3,03 bc	0,34 ab
	N ₁ S ₀	5.996 abc	20 a	122.125 a	2,84 c	0,34 a
	N ₁ S ₁	5.747 abcd	20 a	114.953 abc	3,10 abc	0,33 abc
<i>Eclipse</i>						
	N ₀ S ₀	5.424 bcd	16 bc	88.667 cd	3,35 a	0,30 de
	N ₀ S ₁	4.629 cd	16 c	74.907 d	3,19 ab	0,29 e
	N ₁ S ₀	7.082 a	17 bc	121.732 ab	3,21 ab	0,32 bcd
	N ₁ S ₁	6.346 ab	16 c	102.556 abcd	3,28 ab	0,31 cde
	Nitrógeno (N)	***	NS	***	NS	NS
	Azufre (S)	NS	NS	NS	NS	NS
	Genotipo (G)	NS	***	NS	**	***
	NxS	NS	NS	NS	NS	NS
	NxG	NS	NS	NS	NS	NS
	SxG	NS	NS	NS	NS	NS
	NxSxG	NS	NS	NS	NS	NS
2008						
<i>Filial UofA</i>						
	N ₀ S ₀	5.163 c	19 a	99.856 b	2,90 ab	0,33 b
	N ₀ S ₁	4.481 c	20 a	88.538 b	3,12 a	0,32 b
	N ₁ S ₀	7.534 b	20 a	153.406 a	3,01 ab	0,33 b
	N ₁ S ₁	7.888 b	21 a	165.186 a	2,85 b	0,36 a
<i>Eclipse</i>						
	N ₀ S ₀	5.532 c	15 b	83.455 b	3,08 ab	0,30 c
	N ₀ S ₁	5.487 c	16 b	86.734 b	2,98 ab	0,29 c
	N ₁ S ₀	9.571 a	16 b	152.817 a	2,98 ab	0,29 c
	N ₁ S ₁	10.403 a	16 b	163.282 a	2,91 ab	0,30 c
	Nitrógeno (N)	***	NS	***	NS	NS
	Azufre (S)	NS	NS	NS	NS	NS
	Genotipo (G)	**	***	NS	NS	***
	NxS	NS	NS	NS	NS	NS
	NxG	NS	NS	NS	NS	NS
	SxG	NS	NS	NS	NS	NS
	NxSxG	NS	NS	NS	NS	NS

Nota: Letras distintas indican diferencias entre tratamientos de fertilización y genotipos dentro de cada año ($p < 0,05$). *, **, *** corresponden a $p < 0,05$; 0,01 y 0,001; respectivamente. NS: no significativo.

Los cambios en el rendimiento fueron asociados positiva y significativamente ($p < 0,001$) con cambios en la biomasa aérea total (Figura 3.5). La pendiente de esta relación es una estimación del índice de cosecha (IC), que en promedio para los tres años experimentales fue de 0,33 y 0,29 para *Filial UofA* y *Eclipse*, respectivamente. Las diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las pendientes de ambos genotipos indican una mayor partición a grano en la variedad *Filial UofA*, aunque en términos agronómicos estas diferencias pueden resultar poco relevantes. Los valores de IC estimados mediante el ajuste lineal de todas las observaciones son coincidentes con los valores calculados individualmente para cada combinación de tratamiento y genotipo, donde también se detectaron diferencias significativas sólo entre genotipos en los tres años experimentales (Tabla 3.7).

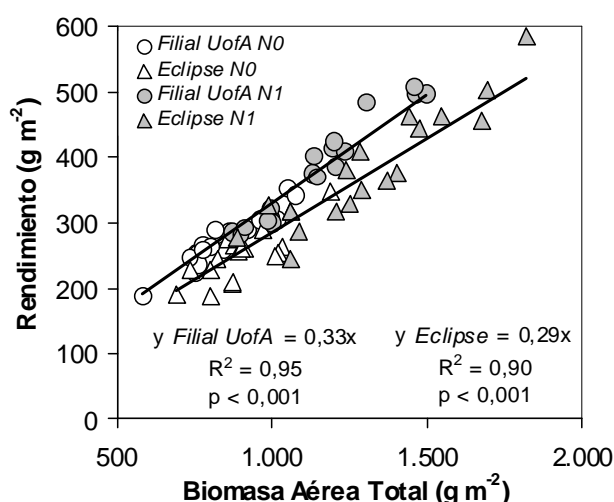


Fig. 3.5. Relación entre el rendimiento en grano (g m^{-2}) y la biomasa aérea total (g m^{-2}) para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (círculos: *Filial UofA* y triángulos: *Eclipse*) en tres años (2006, 2007 y 2008). Se muestran ajustes lineales a los datos (forzados a 0). Los símbolos vacíos corresponden a los tratamientos N_0 y los grises a los N_1 . Se incluyeron también los tratamientos con S.

Los cambios en el rendimiento estuvieron fuertemente asociados a cambios en el NG (Figura 3.6 a), mientras que no hubo asociación con el PG en ninguno de los dos genotipos (Figura 3.6 b). Al incluir ambas variables en un modelo de regresión múltiple, se observó que el NG explicó 97,9% de la variación del rendimiento (datos no mostrados). *Eclipse* mostró un rango de variación mayor para NG y PG, alcanzando mayor PG que *Filial UofA* (Figura 3.6 b). Si bien las pendientes de la relación rendimiento y NG de ambos genotipos fueron significativamente diferentes ($p < 0,05$), en términos agronómicos no representan una diferencia importante. Al asociar el PG y el NG (Figura 3.7), no se halló ningún tipo de relación entre ambas variables. El rango de variación del NG fue mayor que el observado en el PG (CV de 15,3 y 5,6 % para NG y PG).

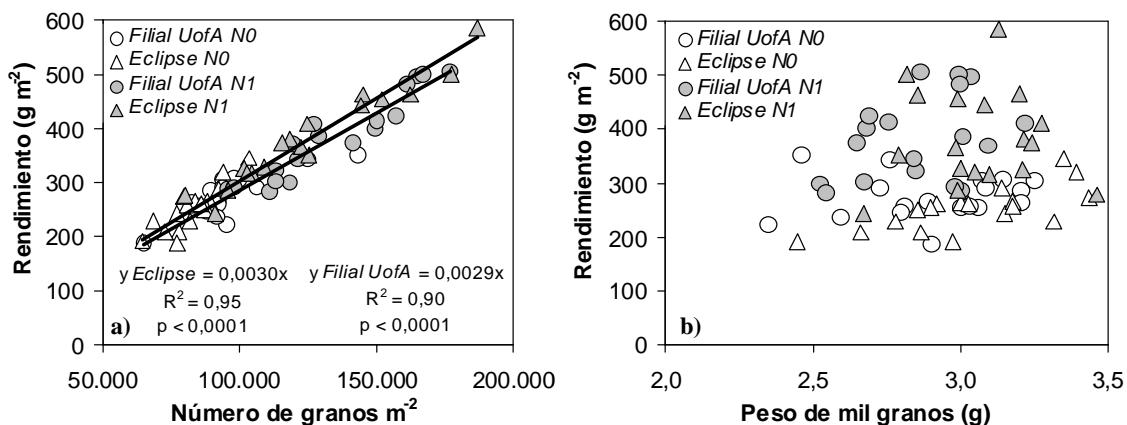


Fig. 3.6. Relación entre el rendimiento (g m^{-2}) y a) el número de granos (granos m^{-2}) y b) el peso de mil granos (g) para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (círculos: Filial UofA y triángulos: Eclipse) en tres años (2006, 2007 y 2008). En a) se muestran ajustes lineales a los datos (forzados a 0). Los símbolos vacíos corresponden a los tratamientos N_0 y los grises a los N_1 . Se incluyeron también los tratamientos con S.

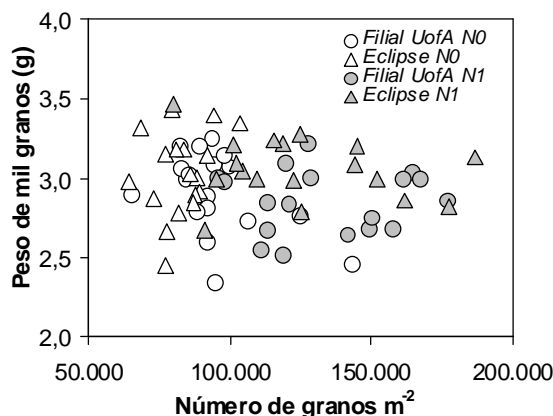


Fig. 3.7. Relación entre el peso de mil granos (g) y el número de granos por unidad de área (granos m^{-2}) para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (círculos: Filial UofA y triángulos: Eclipse) en tres años (2006, 2007 y 2008). Los símbolos vacíos corresponden a los tratamientos N_0 y los grises a los N_1 . Se incluyeron también los tratamientos con S.

De los componentes del número de granos por unidad de área, sólo existió asociación entre el rendimiento y el número de silicuas por metro cuadrado (Figura 3.8). El mayor rendimiento de Filial UofA para un mismo NS, fue explicado por su mayor NGS (19 vs. 16 para Filial UofA y Eclipse, respectivamente; Tabla 3.8).

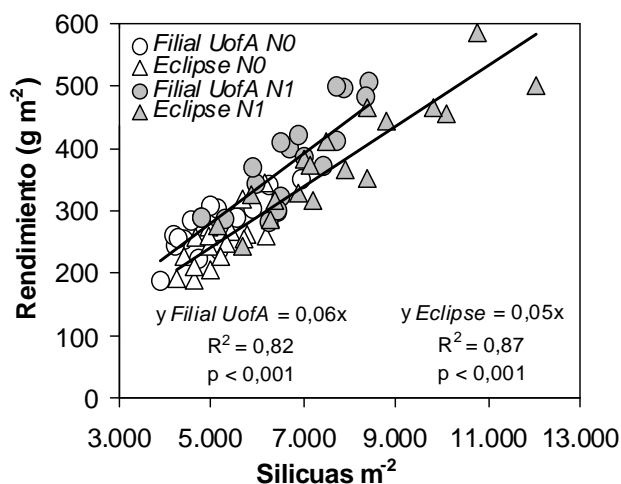


Fig. 3.8. Relación entre el rendimiento (g m^{-2}) y el número de silicuas (silicuas m^{-2}) para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (círculos: Filial UofA y triángulos: Eclipse) en tres años (2006, 2007 y 2008). Se muestran ajustes lineales a los datos (forzados a 0). Los símbolos vacíos corresponden a los tratamientos N_0 y los grises a los N_1 . Se incluyeron también los tratamientos con S.

Para explicar los cambios en las silicuas m^{-2} se analizó el efecto de la fertilización con N y S sobre el número de silicuas por planta (Figura 3.9). Si bien este parámetro fue muy variable entre plantas y entre repeticiones, se pudo observar algún efecto de la fertilización. En los años 2007 y 2008 se hallaron diferencias significativas entre tratamientos de N, mientras que en el 2006 no hubo cambios en el número de silicuas por planta entre tratamientos de N. En cuanto al efecto del S, sólo en el 2008 se observaron diferencias significativas ($p < 0,05$) en el número de silicuas por planta entre tratamientos de S, registrándose interacciones dobles y triples. El número de silicuas por planta en ramas y tallo principal respondió diferencialmente a la fertilización (Figura 3.9). Especialmente en los años 2007 y 2008 el número de silicuas en el tallo principal no mostró grandes variaciones en los distintos tratamientos de N y S, mientras que las silicuas en las ramas se incrementaron ante una mayor oferta de N. De esta manera, el aumento del número total de silicuas por planta generado por el N fue explicado por cambios en las silicuas provenientes de las ramas.

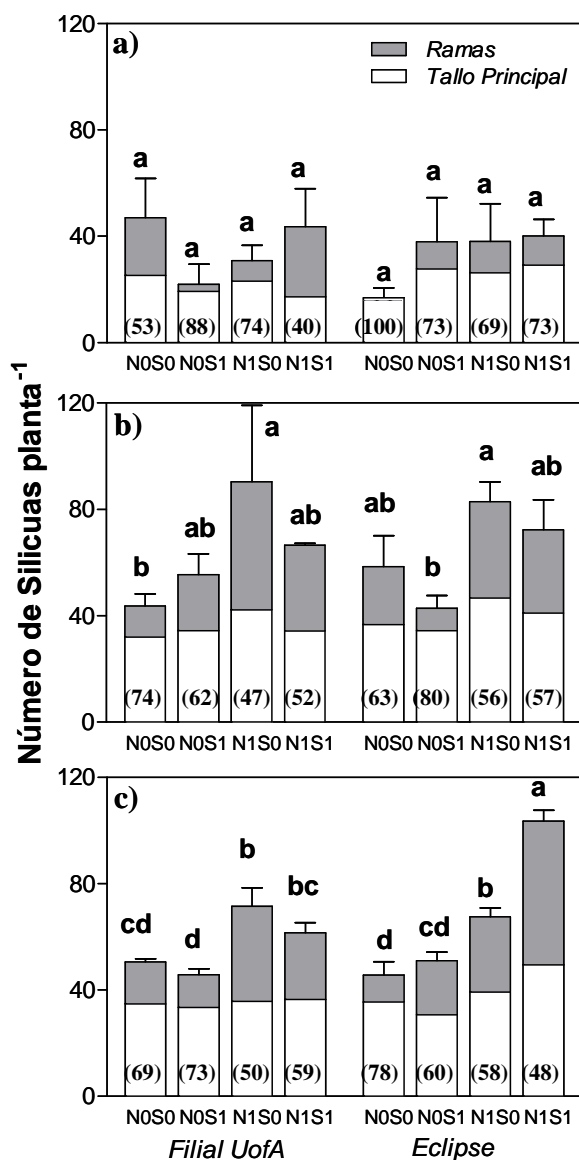


Fig. 3.9. Número de silicuas por planta en tallo principal (barras blancas) y ramas (barras grises) para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (Filial UofA y Eclipse) en tres años: a) 2006, b) 2007 y c) 2008. Los números entre paréntesis indican el porcentaje de silicuas en el tallo principal. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos y genotipos dentro de cada año ($p < 0,05$). Las barras de error muestran el error estándar correspondiente al número total de silicuas por planta. Los códigos de los tratamientos y las dosis de fertilizante aplicados en cada año están descriptos en la Tabla 3.2.

En relación al cuaje de los granos (relación silicuas fértiles/flores abiertas), en el tallo principal no se hallaron diferencias significativas ni entre tratamientos de N y S ni entre genotipos en los tres años de ensayo (datos no mostrados). Por este motivo, se estableció una única regresión entre el número de silicuas fértiles y número total de flores abiertas en el tallo principal (Figura 3.10) donde la pendiente de la regresión indica la proporción de cuaje, que en conjunto fue de 0,58.

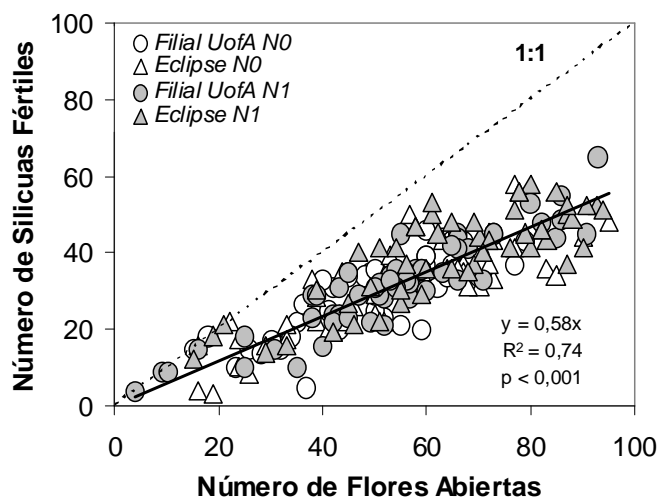


Fig. 3.10. Relación entre el número de silicuas fértiles y el número de flores abiertas en el tallo principal para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (círculos: *Filial UofA* y triángulos: *Eclipse*) en tres años (2006, 2007 y 2008). Se muestran ajustes lineales a los datos (forzados a 0) y la relación 1:1. Los símbolos vacíos corresponden a los tratamientos N_0 y los grises a los N_1 . Se incluyeron también los tratamientos con S.

En cuanto a la tasa de aparición de flores, considerando el promedio de tratamientos de fertilización y años, fue de 3 y 4 flores por día para *Filial UofA* y *Eclipse*, respectivamente, con una duración de la floración en el tallo principal de 16 días (Tabla 3.9). La mayor tasa de aparición de flores explica el mayor número final de flores alcanzado en el tallo principal por *Eclipse* en relación al cultivar *Filial UofA* (41 vs. 49 flores, 63 vs. 75 flores y 56 vs. 59 flores para *Filial UofA* vs. *Eclipse* en los años 2006, 2007 y 2008, respectivamente). La dinámica de aparición de flores del tallo principal manifestó algunos cambios entre tratamientos de fertilización. En el año 2008, con el mayor aporte de N en relación al control, se observaron las mayores diferencias entre tasas y momentos de finalización de la aparición de flores. En los tratamientos con alta disponibilidad de N, la tasa de aparición de flores aumentó con respecto al tratamiento control, mientras que la duración del periodo entre inicio y fin de la aparición de flores en la vara principal se redujo levemente, en consecuencia el número final de flores fue mayor en ambos genotipos para el tratamiento con mayor oferta de nitrógeno (52 vs. 59 flores en N_0 y N_1 para *Filial UofA* y 53 vs. 66 flores en N_0 y N_1 para *Eclipse*). Sin embargo, en los años 2006 y 2007 las diferencias halladas fueron menores y no tan claras entre tratamientos de N.

Tabla 3.9. Ajuste (r^2), tasa (flores día⁻¹) y fin de aparición de flores (día) de las ecuaciones bi-lineales de la evolución del número de flores en el tiempo para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (Filial UofA y Eclipse) en los tres años (2006, 2007 y 2008). Los códigos de los tratamientos y las dosis de fertilizante aplicados en cada año están descriptos en la Tabla 3.2.

Año	Tratamiento	Filial UofA			Eclipse		
		r^2	Tasa (flores día ⁻¹)	Fin Aparición Flores (día)	r^2	Tasa (flores día ⁻¹)	Fin Aparición Flores (día)
2006	N ₀ S ₀	0,98	3,46 a	12,86 a	0,98	2,88 b	11,21 c
	N ₀ S ₁	0,99	2,72 b	12,50 a	0,99	3,31 b	15,71 a
	N ₁ S ₀	0,98	3,00 ab	12,65 a	0,99	3,37 b	15,53 a
	N ₁ S ₁	0,95	2,03 c	14,84 a	0,99	3,94 a	13,52 b
2007	N ₀ S ₀	0,98	3,00 ab	15,99 a	0,98	3,56 a	18,93 a
	N ₀ S ₁	0,99	3,06 ab	17,76 a	0,98	3,28 a	18,80 a
	N ₁ S ₀	0,98	3,46 a	17,47 a	0,98	3,88 a	16,83 ab
	N ₁ S ₁	0,99	2,78 b	17,94 a	0,98	3,85 a	16,65 b
2008	N ₀ S ₀	0,99	2,83 b	17,49 a	0,99	3,12 c	16,40 ab
	N ₀ S ₁	0,98	2,41 c	18,81 a	0,99	2,96 c	17,56 a
	N ₁ S ₀	0,97	3,06 ab	16,67 ab	0,99	3,68 b	15,61 b
	N ₁ S ₁	0,98	3,41 a	15,82 b	0,99	4,32 a	15,47 b

Letras distintas indican diferencias significativas en los intervalos de confianza entre tratamientos dentro de cada año y genotipo ($p < 0,05$).

3.3.4. Eficiencia de uso del nitrógeno

El rendimiento en grano se relacionó lineal y positivamente con el nitrógeno disponible durante el ciclo del cultivo (Figura 3.11 a). Para el rango de N disponible utilizado en esta tesis la eficiencia agronómica en el uso del nitrógeno (EAUN) fue de 8,3 kg de grano por kg de N disponible, obteniendo una ordenada al origen, para la regresión, que fue elevada *i.e.* 2130 kg de grano ha⁻¹. El rendimiento también se asoció lineal y positivamente con el nitrógeno absorbido por el cultivo (Figura 3.11 b), indicando la pendiente de esta relación la eficiencia fisiológica en el uso del nitrógeno (EFUN), que fue de 22,8 kg de grano por kg de N absorbido. La última eficiencia estimada surge de la relación entre el nitrógeno absorbido y el disponible (Figura 3.11 c). La pendiente de esta relación es la eficiencia de absorción del nitrógeno (EAN) que fue de 0,45 kg N absorbido por kg N disponible. Nuevamente, la ordenada en origen, que indica la capacidad de mineralización del suelo (*i.e.* cuando el suelo presenta 0 Kg ha⁻¹ de N disponible) fue más elevada que lo esperado, *i.e.* 79,6 kg N ha⁻¹. Por este motivo, surgió la necesidad de estimar el aporte de N por mineralización, como otra posible fuente de N que no había sido contemplada hasta el momento, por vías alternativas. Las estimaciones de N aportado por mineralización de la materia orgánica arrojaron valores de *ca.* 32-46 kg N ha⁻¹, con un valor promedio para los tres años de ensayo de 38 kg N ha⁻¹. Se re-analizó la Figura 3.11 c sumándole a cada valor de N disponible el N aportado por mineralización cada año, pero la relación y la ordenada en origen fueron similares a las de la figura presentada (datos no mostrados). Considerando el valor estimado de mineralización utilizando la proyección de la ordenada al origen y el calculado a través de la aporte de la materia orgánica, aún restaría explicar el origen de los 42 kg N ha⁻¹ restantes de la diferencia entre ambos. Posibles fuentes de variación de estos datos serán discutidas en la sección siguiente.

En la Figura 3.11 no se discriminaron los dos genotipos utilizados porque no se observaron diferencias genotípicas en dichas respuestas, y tampoco hubo un efecto del

azufre en las eficiencias calculadas, ya que los tratamientos S_0 y S_1 se agruparon en funciones únicas de respuesta. Una posible explicación de la falta de efecto del S surgió al estimar los aportes de S por mineralización de la materia orgánica, que fueron en promedio para los tres años de $5,4 \text{ kg ha}^{-1}$. Como se discutirá en la sección siguiente, el contenido final de S disponible (*i.e.* inicial del suelo + aportado por mineralización) de los tratamientos S_0 , seguramente no fue tan bajo como para que el cultivo estuviera limitado por este nutriente.

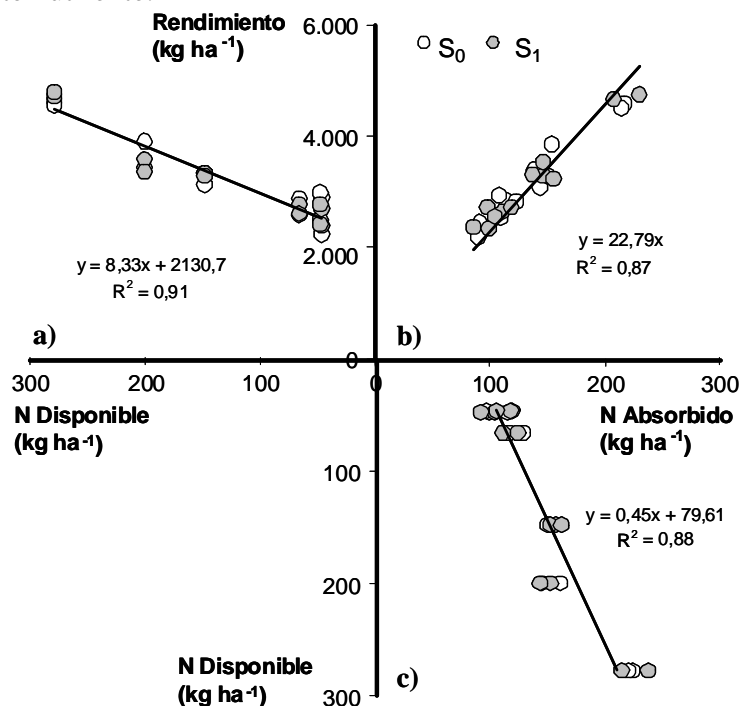


Fig. 3.11. Relación entre a) Nitrógeno disponible y rendimiento, b) Nitrógeno absorbido y rendimiento y c) Nitrógeno disponible y Nitrógeno absorbido, todos en kg ha^{-1} , para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (Filial UofA y Eclipse) en los tres años (2006, 2007 y 2008). Los símbolos blancos corresponden a los tratamientos S_0 y los grises a los S_1 .

Los cálculos de diferencial de nitrógeno ($\text{N Absorbido} - \text{N Disponible}$) muestran que algunos años y tratamientos tuvieron una menor absorción que el N que había disponible, dando un diferencial de N negativo (Figura 3.12 a). Estos diferenciales de N negativos coincidieron con los tratamientos de mayor disponibilidad de N ($> 150 \text{ kg N ha}^{-1}$). En las situaciones de baja disponibilidad de N, los diferenciales fueron muy elevados, indicando que el cultivo absorbió mucho más del N disponible y es en estos casos donde posiblemente el aporte de N por mineralización haya cobrado mayor importancia. La eficiencia agronómica (EAUN) también mostró una relación negativa con el nivel de nitrógeno disponible (Figura 3.12 b), y a medida que la disponibilidad de N aumenta, la eficiencia cae hasta un nivel crítico de N (*ca.* 200 kg N ha^{-1}), a partir del cual la eficiencia se mantuvo constante.

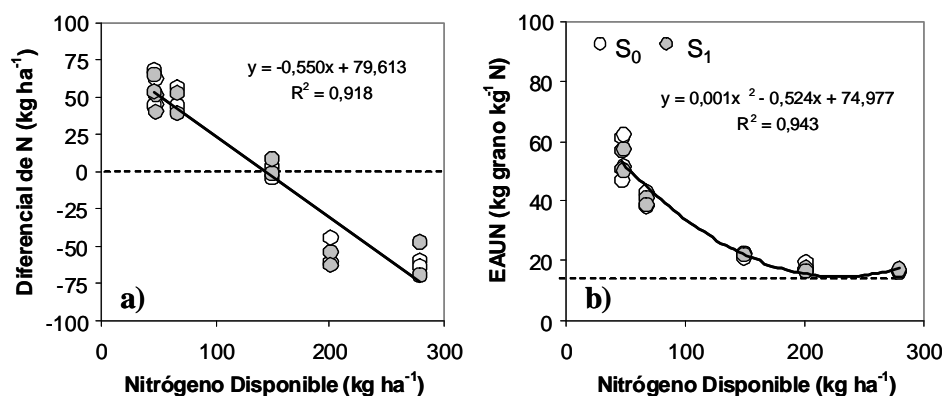


Fig. 3.12. Relaciones entre el nitrógeno disponible (kg ha^{-1}) y a) el diferencial de N ($N_{\text{Absorbido}} - N_{\text{Disponible}}$) y b) la eficiencia agronómica en el uso del nitrógeno ($\text{kg grano kg}^{-1} N_{\text{disponible}}$) para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (Filial UofA y Eclipse) en los tres años (2006, 2007 y 2008). La línea punteada señala en a) el diferencial de $N=0$ y en b) el punto mínimo de la polinómica.

3.4. DISCUSIÓN

En este capítulo se estudiaron los efectos de la fertilización nitrógeno-azufrada aplicada durante todo el ciclo de cultivo sobre el rendimiento en grano y sus componentes numéricos y fisiológicos en dos genotipos de colza-canola. Se observaron efectos significativos del N sobre el rendimiento y la producción de biomasa (Figura 3.1 y 3.4), y hubo una inesperada falta de respuesta al S y una interacción $N \times S$ que resultó no significativa para la mayoría de las variables analizadas (Tablas 3.6, 3.7 y 3.8). Una posible causa de la falta de respuesta en las variables estudiadas a la disponibilidad de S podría deberse a una elevada oferta de este elemento en los tratamientos S_0 . El contenido de S disponible en S_0 para el cultivo fue de 9,1; 15,9 y 14,6 kg S ha^{-1} en el 2006, 2007 y 2008, respectivamente; pero al sumar el aporte de S estimado por mineralización de la materia orgánica (*i.e.* en promedio 5,4 kg S ha^{-1}), hubo disponible 14,5; 21,3 y 20,0 kg S ha^{-1} en el 2006, 2007 y 2008, respectivamente. Estos valores resultan superiores a 10,0 y 12,5 kg S ha^{-1} , que corresponden al límite de respuesta en rendimiento al agregado de S hallado por Malhi *et al.* (2007) y Blake-Kalff *et al.* (2000), aunque los mismos se obtuvieron en ensayos a campo con fertilización sólida a la siembra. Por lo tanto, es posible especular que el cultivo no estuvo limitado por S en los tratamientos S_0 , de manera que la disponibilidad de S en los tratamientos control de esta tesis fue suficiente para cubrir las necesidades de este nutriente, lo que explica la ausencia de respuesta al agregado de S en los componentes fisiológicos del rendimiento y de interacción $N \times S$. Estos resultados sugieren la relevancia de contemplar el aporte de S por mineralización, aproximación que es más común de tener en cuenta para el caso del N, al momento de decidir una fertilización azufrada.

El rendimiento en grano aumentó con una mayor disponibilidad de nitrógeno en el rango de 47 a 279 kg N ha^{-1} (Figura 3.4; Figura 3.11 a), al igual que lo hallado en varios trabajos previos, tanto en condiciones de campo como en contenedores (Dreccer *et al.*, 2000; Hocking *et al.*, 1997; Asare y Scarisbrick, 1995; Scott *et al.*, 1973; Allen y Morgan, 1972). Si embargo, la respuesta del rendimiento fue lineal en todo el rango de N explorado (Figura 3.11), sin hallarse un límite de respuesta al agregado de N, como sí encontró Hocking *et al.* (1997) y Zhao *et al.* (1993), con 140 kg ha^{-1} N disponible y 200 kg ha^{-1} N disponible, respectivamente. En ensayos a campo realizados en tres

localidades de Argentina, el rendimiento aumentó asintóticamente aún con 220 kg N ha⁻¹ disponible, que fueron las máximas disponibilidades evaluadas (Gambaudo y Fontanetto, 2008). Dreccer *et al.* (2000), en ensayos en contenedores y con fertilización líquida, también hallaron una respuesta lineal del rendimiento al agregado de N, en el rango de 50 a 180 kg ha⁻¹ de N disponible. En los ensayos de la presente tesis y en el trabajo de Dreccer *et al.* (2000), los aportes de fertilizante líquido a bajas dosis continuamente en todo el ciclo sumado a la constante incorporación de agua junto con la fertilización, podían ser las posibles causas de ausencia de limitación por N del cultivo, determinando la linealidad en las respuestas halladas. Así, estos resultados parecen indicar que el cultivo tiene capacidad de seguir incrementando su rendimiento aún con disponibilidades de N muy altas (> 200 kg N ha⁻¹), si no existen otras limitantes para la generación del rendimiento, como estrés hídrico. Este aspecto del cultivo resulta interesante para ser validado a campo en planteos productivos de alta potencialidad en zonas bajo riego (*e.g.* Mendoza), donde es fundamental obtener rendimientos elevados, para que los márgenes del cultivo sean rentables.

La oferta de S no alteró las distintas eficiencias de uso del N, *i.e.* EAUN, EAN y EFUN (Figura 3.11). El valor de EAUN obtenido en la presente tesis (8,3 kg ha⁻¹ por kg de nitrógeno disponible) fue ligeramente superior a valores obtenidos en ensayos de colza-canola a campo en Argentina (*ca.* 5,4 kg kg⁻¹ N disponible; Gambaudo y Fontanetto, 2008), donde la menor disponibilidad de agua pudo haber limitado el rendimiento y la eficiencia en el uso del N (Timisina *et al.*, 2001; De Wit, 1953). En trigo, se obtuvieron valores de EAUN de 10,8-15,8 kg kg⁻¹ N disponible (Salvagiotti *et al.*, 2009), con cambios en las pendientes por efecto del S (10-40 kg ha⁻¹ S disponible) y de 9,2 kg kg⁻¹ N aplicado (Delogu *et al.*, 1998), resultando algo superiores a las eficiencias de colza-canola. Esta menor eficiencia (EAUN) en colza-canola respecto de trigo puede ser explicada en parte por: (i) el costo energético de producción de este grano con contenidos de aceite de 40-50 %, y por (ii) el menor índice de cosecha de colza-canola, ya que se ha observado que los rendimientos e índices de cosecha de trigo y colza-canola, se aproximan bastante al corregirlos por el costo de síntesis del aceite (Dreccer *et al.*, 2000). Por lo tanto, resulta más correcto comparar eficiencias corregidas (Tabla 3.7), especialmente entre distintos cultivos y zonas de producción; sin embargo, no son demasiados los trabajos que realizan estas estimaciones. La utilidad de haber realizado un estudio que haya abordado las eficiencias de utilización del N y cuantificado las mismas en el cultivo de colza-canola, radica en la posibilidad de tener una mejor comprensión de la respuesta de este cultivo a la fertilización nitrogenada, el impacto del S y la interacción NxS. Si bien la información generada en contenedores con fertilizaciones líquidas no es totalmente trasladable a situaciones productivas, es una primera aproximación para los genotipos y condiciones ambientales locales, que deberá ser validada en condiciones a campo.

La EAUN se asoció negativamente con la disponibilidad de N en el suelo (Figura 3.12 b), en línea con otros resultados de la literatura tanto en colza-canola como en trigo (Gan *et al.*, 2008; Dreccer *et al.*, 2000; Hocking *et al.*, 1997; Doyle y Holford, 1993). En cuanto a la eficiencia de absorción del nitrógeno (EAN; Figura 3.11 c), mostró valores similares a los obtenidos para trigo por Salvagiotti *et al.* (2009), quienes obtuvieron valores de entre 0,42 y 0,70 kg N absorbido kg N disponible⁻¹, para situaciones de baja y alta oferta de azufre, aunque en el presente trabajo no hubo diferencias entre tratamientos de S. Además, la ordenada en origen hallada (*i.e.* 79,6 kg N ha⁻¹) fue algo superior a la obtenida para trigo en condiciones de campo en ese mismo trabajo, con valores de 66-71 kg N ha⁻¹ (Salvagiotti *et al.*, 2009). Como se mencionó anteriormente, la estimación del N disponible por mineralización de la materia orgánica

(37,5 kg N ha⁻¹) explicó parte de estas diferencias. Dos posibles fuentes de variación de estos resultados son las estimaciones del N disponible y del N absorbido. En la valoración del N disponible en los tratamientos N₁, se consideraron todas las aplicaciones de solución hasta el momento de madurez fisiológica. Considerar la absorción en etapas postfloración es correcto teniendo en cuenta los resultados hallados por Malagoli *et al.* (2005), quienes siguiendo la evolución de la absorción de N en un genotipo de colza-canola invernal, midieron un 30 % de la absorción total de N durante el llenado de los granos, y alcanzaron el plateau de absorción de N a mitad del llenado, con alta disponibilidad de N en el suelo y ausencia de déficit hídrico.

La estimación del N absorbido es otra posible fuente de variación, y pudo tener valores mayores a los esperados por tres causas: (i) elevados contenidos de N en el grano; (ii) una sobre-estimación del rendimiento en grano, y/o (iii) un bajo valor de ICN utilizado. El contenido de N en grano (*i.e.* entre 2,6 y 4,0 % N) fue acorde con las mediciones realizadas en otros genotipos de colza-canola en las mismas condiciones ambientales del presente estudio (Vilariño *et al.*, 2009) y similar a lo observado por Hocking *et al.* (1997), quienes obtuvieron valores de entre 2,8 y 3,8 % N en grano, para los distintos niveles de disponibilidad de N. En cuanto a la estimación del rendimiento, al haberse cosechado a mano el ensayo y no incluirse ningún tipo de pérdidas de cosecha, es probable que exista una sobre estimación respecto de los valores de rendimiento en ensayos a campo cosechando mecánicamente, lo que explicaría los altos rendimientos hallados a bajas ofertas de N en comparación con situaciones reales de producción en el país, donde el rendimiento medio de los últimos 5 años es de *ca.* 1400 kg ha⁻¹ (MAGyP, 2010). En cuanto al valor de ICN utilizado, de 0,76 de acuerdo con Hocking *et al.* (1997), este incluye el N que retorna al suelo por las hojas senescentes, y es acorde a las estimaciones realizadas por Dreccer *et al.* (2000), quienes obtuvieron valores de 0,69-0,79. Existe una consideración adicional respecto a este índice, y es que en trigo existen evidencias de caídas del ICN ante aumentos en la disponibilidad de N (Barraclough *et al.*, 2010; Salvagiotti *et al.*, 2009; Kindred y Gooding, 2004; Le Gouis *et al.*, 2000). Sin embargo, en colza-canola, en ensayos en macetas (Dreccer *et al.*, 2000) y a campo (Hocking y Stapper, 2001), no se hallaron cambios importantes en el ICN; mientras que Hocking *et al.* (1997), en ensayos a campo en dos localidades en Australia, sólo hallaron caídas del ICN en una localidad en los niveles más altos de N disponible (121 y 171 kg ha⁻¹ N disponible). Debido a esta variabilidad en la información, se asumió un ICN constante. Así, la causa más probable de sobrevaloración del N absorbido podría radicar en los altos rendimientos obtenidos, dado que el contenido de N en el grano y el ICN asumidos en los cálculos en este trabajo están de acuerdo con los datos de la literatura.

Los tratamientos de fertilización provocaron cambios en el rendimiento que estuvieron asociados a incrementos en la biomasa aérea total (Figura 3.1), sin manifestarse cambios en la partición de biomasa a grano, evaluada a través del IC, y a raíz. La estabilidad en el IC ante cambios en la fertilización (Figura 3.5, Tabla 3.8) fue acorde a lo encontrado por la mayoría de los autores (Hocking *et al.*, 1997; Schjoerring *et al.*, 1995; Hocking y Stapper, 1993) y con escasas diferencias entre los genotipos evaluados. Sin embargo, se contradice a lo observado por Dreccer *et al.* (2000), quienes en condiciones experimentales muy similares a las del presente trabajo pero en contenedores de menor profundidad (40 cm), mostraron aumentos del IC de 3 puntos porcentuales al pasar de dosis de N de 20 a 110 kg N ha⁻¹. La aparente estabilidad del IC podría ser un obstáculo para el mejoramiento genético de esta especie, ya que es sabido que este es el parámetro que más limita el rendimiento (Diepenbrock, 2000). En cuanto a la partición de biomasa a raíz, evaluada a través de la relación entre la biomasa radical

y la BAT, no manifestó cambios importantes con la disponibilidad de N, con un valor promedio para ambos años de 17 %, resultando similar a valores obtenidos en arroz con baja disponibilidad de N (18 %; Cassman *et al.*, 1995), aunque en este trabajo la partición a raíz se reduce al 11 % al aplicar 190 kg N ha⁻¹. La relación raíz:tallo tampoco se modificó significativamente pero tendió a reducirse con la mayor oferta de N, al igual que lo observado en trabajos previos (Schulte auf'm Erley *et al.*, 2007; Dreccer *et al.*, 2000). Serán necesarios trabajos que validen a campo el comportamiento de las raíces con la nutrición, y realizar estudios más complejos a nivel radical serían importantes para incorporar estos atributos dentro de los planes de mejoramiento de la especie, ya sea para optimizar la utilización de agua del perfil del suelo y/o para mejorar el anclaje del cultivo.

De los componentes fisiológicos de la biomasa (RFAint Ac y EUR), varios autores coinciden en que la RFAint Ac es más variable que la EUR y aumenta ante una mayor oferta de N (Tabla 3.7) (Dreccer *et al.*, 2000; Justes *et al.*, 2000; Fischer, 1993). Los valores de EUR obtenidos en el presente estudio (1,74, 2,55 y 2,24 g MJ⁻¹ para el 2006, 2007 y 2008, respectivamente) resultaron menores a los descriptos por otros autores (*i.e.* 2,71-3,50 g MJ⁻¹ según Rao y Mendham, 1991; 3,5 g MJ⁻¹ según Mendham y Salisbury, 1995), probablemente debido a que en estos trabajos estiman la EUR hasta la floración, donde la eficiencia es máxima (sin considerar la producción de grano con mayor costo energético), e incluyen dentro de la biomasa aérea a las hojas senescentes. La EURc tuvo valores de entre 2,4 y 4,7 g glucosa MJ⁻¹, similares a los obtenidos por Dreccer *et al.* (2000), aunque estos autores calcularon las eficiencias a través de regresiones entre la biomasa acumulada y RFA interceptada acumulada durante el llenado de los granos, y en este trabajo se consideró todo el ciclo. Comparativamente con trigo, la EURc observada durante el llenado en colza-canola es menor (Dreccer *et al.*, 2000), asociado posiblemente al cambio de las hojas a las silicuas como el principal lugar de asimilación de CO₂ (Rood *et al.*, 1984), ya que estas últimas tienen una menor capacidad fotosintética (Gammelvind *et al.*, 1996). En el presente trabajo, tanto la EUR como la EURc aumentaron significativamente con el agregado de N el año de mayor dosis de N (279 kg ha⁻¹ en el año 2008). En los otros dos años, la respuesta fue menor o nula, en coincidencia con Andersen *et al.* (1996) y Wright *et al.* (1988) que no hallaron respuesta del N sobre la EUR. Un posible mecanismo responsable de esta respuesta sería un efecto promotor del N sobre la EUR con disponibilidades de N muy elevadas, de manera de promover la actividad de la enzima ribulosa bifosfato carboxilasa oxigenasa (Rubisco) y aumentar así la capacidad fotosintética de las silicuas. Mientras que a dosis bajas de N, se podría estar promoviendo el área foliar por planta pero no la concentración de N por unidad de área foliar, no generando un incremento de la capacidad fotosintética (Sinclair y Horie, 1989). Futuros ensayos deberían incluir mediciones del N foliar específico y/o fotosíntesis máxima para profundizar en este aspecto de la fertilización nitrogenada.

Por último, analizando los componentes numéricos del rendimiento, el NG fue el que mejor explicó los cambios en el rendimiento por agregado de N, al igual que lo mostrado por otros autores al relacionar estas variables, tanto en colza-canola (Peltonen-Saino y Jauhiainen, 2008; Gómez, 2007; Scarisbrick *et al.*, 1981), cebada (Arisnabarreta y Miralles, 2006), trigo (Fischer, 1993) y girasol (Cantagallo *et al.*, 1997). El aumento del NG por el agregado de N estuvo principalmente explicado por incrementos en el número de silicuas por unidad de superficie, ya que el número de granos por silicua no fue afectado por el N (Tabla 3.8). Numerosos trabajos muestran al número de silicuas como los componentes más afectados por la fertilización nitrogenada (Cheema *et al.*, 2001; Hocking *et al.*, 1997; Asare y Scarisbrick, 1995), siendo el aumento del índice de

área foliar y de la tasa de crecimiento del cultivo lo que explica la mayor disponibilidad de asimilados para fijar un mayor número de estructuras reproductivas (Allen y Morgan, 1972). Por lo tanto, será valioso incluir estas variables en futuros trabajos que evalúen los cambios en los componentes del rendimiento de colza-canola por agregado de N. Para ello sería útil contar en colza-canola con métodos indirectos no destructivos de estimación del área foliar por planta como los existentes en trigo, maíz y girasol (Loomis y Connor, 1992) y con métodos alométricos no destructivos que permitan estimar la tasa de crecimiento del cultivo, como los disponibles en maíz (Otegui y Slafer, 2000). Hasta el momento estos métodos no han sido desarrollados en colza-canola. En cuanto al PG, el mismo no varió con la fertilización nitrogenada, en coincidencia con Hocking y Mason (1993) y Ogunlela *et al.* (1990), posiblemente porque no fue afectado el tamaño de la fuente carbonada disponible para el llenado de los granos en los tratamientos de baja oferta nutricional. Tampoco existió asociación entre el PG y el NG (Figura 3.7); sin embargo, algunas evidencias (Gómez, 2007; Iglesias, 2006) mostraron en colza-canola una leve asociación negativa entre PG y NG en respuesta a cambios en la relación fuente:destino, sugiriendo una leve limitación por fuente para completar el llenado.

3.5. CONCLUSIONES

La mayor disponibilidad de N lograda mediante aplicaciones sostenidas durante todo el ciclo de cultivo incrementó el rendimiento en grano en ambos genotipos estudiados, a través de aumentos en la biomasa total producida sin cambios en la partición a grano y raíz. Dentro de los componentes numéricos del rendimiento, el NG fue el que mejor explicó el efecto del N, a través de cambios en el número de silicuas logradas en el cultivo. La mayor biomasa total fue explicada por cambios en todas sus fracciones (BT, BS, BRP y BRS), y dentro de sus componentes fisiológicos el N modificó más la radiación interceptada que la EUR. Por último, se puede concluir que la mayor disponibilidad de N reduce la EAUN, pero todas las eficiencias estimadas (EAUN, EAN y EFUN) fueron constantes en los dos genotipos evaluados.

No se ha podido describir el impacto del S sobre estas mismas variables, ni la interacción NxS, debido a la falta limitación por S en los tratamientos S₀ en los tres años de ensayo. En el presente trabajo, bajo condiciones edáficas controladas y sin limitación hídrica, el S no fue limitante para el rendimiento para valores de 9,1-15,9 kg S ha⁻¹ disponibles, que podrían elevarse a 14,5-21,3 kg S ha⁻¹ si se asumen los aportes por mineralización de la materia orgánica. Serán necesarias nuevas investigaciones incluyendo tratamientos con azufre, que exploren ambientes con mayores limitaciones de este nutriente, y en condiciones productivas (suelos agrícolas), para poder concluir sobre la importancia de la fertilización con S y su impacto en el rendimiento en grano en el cultivo de colza-canola en Argentina. Asimismo, el aporte de S por mineralización de la materia orgánica deberá considerarse en futuros estudios.

Se debe tener en cuenta que los resultados hallados en el presente trabajo pueden variar en otras situaciones ambientales, ya que hay factores que pueden influir en la respuesta a la fertilización (*e.g.* disponibilidad de agua, momento de aplicación del fertilizante, tipo de suelo, pH del suelo, contenido de materia orgánica), modificando la magnitud de la respuesta. De esta manera surge la necesidad de realizar nuevos estudios en condiciones de campo donde se combinen la disponibilidad de N en distintos momentos del ciclo y diferentes ofertas hídricas (para nombrar los factores más relevantes), con el fin de poder evaluar las posibles interacciones entre factores.

Además, será necesario validar a campo con fertilizaciones sólidas las respuestas halladas en el presente trabajo, como una etapa previa a la de elaborar estrategias de fertilización nitrogenada en el cultivo de colza-canola para las condiciones del país. En especial, la respuesta en rendimiento al nitrógeno disponible, que deberá ser generada en ensayos a campo y en los lugares de producción de colza-canola en Argentina, ya que no es posible extrapolar los resultados hallados en Buenos Aires a otras zonas del país.

En el presente capítulo se analizaron los efectos de la fertilización con N y S sobre (i) el rendimiento y sus componentes numéricos, (ii) sobre la biomasa, su partición a grano y raíz, y sus componentes fisiológicos y (iii) sobre las eficiencias de uso del N, en dos genotipos comerciales primaverales medios disponibles en Argentina, hallando relaciones funcionales útiles y jerarquizando las respuestas fisiológicas a ambos nutrientes. En el próximo capítulo se evaluará la influencia de la fertilización con N y S sobre la calidad final del grano.

FERTILIZACION CON NITRÓGENO Y AZUFRE DURANTE EL CICLO DE
CULTIVO: EFECTO SOBRE LA CALIDAD DEL GRANO

- 4.1. Introducción
- 4.2. Materiales y Métodos
 - 4.2.1. Descripción de los experimentos
 - 4.2.2. Mediciones
 - Calidad final del grano
 - Dinámica del peso seco y el perfil de ácidos grasos del grano
 - Condiciones ambientales durante el llenado de los granos
 - 4.2.3. Análisis estadísticos
- 4.3. Resultados
 - 4.3.1. Calidad final del grano
 - 4.3.2. Dinámica del peso seco y el perfil de ácidos grasos del grano
 - 4.3.3. Respuestas de la calidad de grano a las condiciones ambientales postfloración
- 4.4. Discusión
- 4.5. Conclusiones

4.1. INTRODUCCIÓN

Como se demostró en el Capítulo 2 de esta tesis, la calidad del grano de genotipos comerciales de colza-canola disponibles en Argentina está influenciada por el genotipo y las condiciones ambientales experimentadas especialmente durante la etapa de postfloración (en especial la temperatura media). En el Capítulo 3 se analizó también la influencia de la fertilización en genotipos primaverales de colza-canola, especialmente nitrogenada, como práctica de manejo adecuada para maximizar el rendimiento en grano a través de múltiples efectos sobre sus componentes numéricos y fisiológicos. Estas respuestas encontradas en el rendimiento y sus componentes podrían afectar también a la composición química de los granos, siendo necesario así considerar los posibles efectos de la fertilización nitrógeno-azufrada sobre la calidad final de los granos.

El efecto negativo de la fertilización nitrogenada sobre el contenido de aceite del grano ha sido ampliamente estudiado, tanto en colza-canola (Rathke *et al.*, 2005; Hocking *et al.*, 1997; Asare y Scarisbrick, 1995; Holmes y Ainsley, 1977) como en otros cultivos oleaginosos (Triboi y Triboi-Blondel, 2002; Steer *et al.*, 1984). Sin embargo, la tasa de caída de la concentración de aceite en respuesta al N agregado no es tan conocida y hasta el momento no son totalmente claros los mecanismos fisiológicos que llevan a dicha respuesta (Triboi y Triboi-Blondel, 2002). Entre los mecanismos propuestos, el N podría actuar (i) aumentando la cantidad de N disponible por grano (fuente de N) y el porcentaje de proteínas del grano, e indirectamente disminuyendo el contenido relativo de aceite; (ii) incrementando el número de granos y el rendimiento (Capítulo 3), reduciendo la fuente de N disponible por grano si la respuesta del número de granos al N es más que proporcional a la cantidad de N absorbido por grano; o a través de una mayor duración del área foliar y del área verde de silicuas, aumentando la capacidad de fijar carbono (C) del cultivo (fuente de C), necesaria para sostener la acumulación activa de aceite en los granos. La preponderancia de uno u otro mecanismo de acción del N resultarán en una concentración de aceite en los granos particular, que requiere ser cuantificada en genotipos modernos de colza-canola disponibles en Argentina.

Algunos trabajos también han evaluado los cambios en el perfil de ácidos grasos al incrementar el N disponible, hallando un aumento del nivel de instauración junto con reducciones en el contenido de 18:1 (Gao *et al.*, 2010; Behrens, 2002). Ibrahim *et al.* (1989) encontraron estabilidad del perfil con dosis de N de hasta 213 kg N ha⁻¹, pero el cultivo pudo no estar limitado por N, ya que no se informa el nivel de N del suelo. El análisis de la respuesta del perfil ácido a la fertilización adquiere importancia para determinar si planteos de producción con alta fertilización, si bien incrementarían el rendimiento, podrían desmejorar la calidad del grano del cultivo.

Para el caso de la fertilización con azufre, la respuesta del contenido de aceite del grano es menos clara que para el nitrógeno, ya que algunos trabajos muestran aumentos del contenido de aceite con el agregado de S (Malhi *et al.*, 2007), mientras que otros no encuentran respuesta al agregado de este nutriente (Asare y Scarisbrick, 1995). El origen de estas diferencias no es conocido, por lo que debería ser investigado sobre la base de los componentes fisiológicos que determinan la calidad de los granos. También se ha estudiado un efecto positivo del S sobre el contenido de glucosinolatos y una asociación negativa entre la relación N:S absorbidos y el contenido de glucosinolatos indicando una posible interacción entre ambos nutrientes (Fismes *et al.*, 2000). Por lo tanto, el estudio detallado del efecto del S sobre los parámetros de calidad

del grano y su posible interacción con el N parecen relevantes en un cultivo donde la calidad está incluida dentro de las normas de comercialización.

Aunque el contenido de proteínas del grano no está incluido explícitamente dentro de las bases de comercialización de colza-canola, es un atributo de calidad industrial valioso, especialmente para la utilización del grano en alimentación animal. Además, existe una asociación negativa entre el contenido porcentual de aceite y de proteína del grano (Triboi-Blondel y Renard, 1999; Vilariño *et al.*, 2009), de manera que cualquier factor que afecte uno de ellos, también afectará en sentido inverso el contenido del otro. Esta relación inversa ha sido observada por varios autores ante cambios en la disponibilidad de N en el suelo (Brennan y Bolland, 2007; Hocking *et al.*, 1997; Asare y Scarisbrick, 1995), pero hasta el momento no han sido analizados los efectos de la interacción NxS sobre el contenido de proteínas del grano.

El objetivo de este capítulo es analizar el efecto de la disponibilidad de nitrógeno y azufre durante el ciclo de cultivo y de las condiciones ambientales exploradas por los granos durante su crecimiento, sobre la generación de la calidad comercial del grano en dos genotipos (variedad e híbrido) primaverales medios de colza-canola que mostraron similar respuesta del rendimiento a la fertilización (Capítulo 3). Se cuantifican además las respuestas del porcentaje de aceite y proteínas, el perfil de ácidos grasos y los glucosinolatos del grano a la fertilización, a fin de obtener relaciones funcionales útiles para predecir la calidad final del grano y determinar si planteos de alta fertilización orientados a maximizar el rendimiento pueden causar efectos detrimentales sobre la calidad de los granos.

4.2. MATERIALES Y MÉTODOS

4.2.1. Descripción de los experimentos

Para llevar a cabo los objetivos específicos del presente capítulo, se realizaron experimentos en contenedores individuales durante los años 2006, 2007 y 2008, aplicando soluciones nutritivas enriquecidas con N y S durante todo el ciclo del cultivo, de manera de obtener distintas combinaciones de los niveles de N y S aplicados. Los detalles de la aplicación de nutrientes y las combinaciones de las soluciones nutritivas se encuentran en el Capítulo 3 (ver sección 3.2.1). Al igual que lo descripto en el capítulo anterior, los tratamientos combinaron bajo N y S (N_0S_0), bajo N y alto S (N_0S_1), alto N y bajo S (N_1S_0) y altos N y S (N_1S_1).

Debido a que las fechas de siembra fueron diferentes entre años (09/08/2006, 29/06/2007 y 25/06/2008), estas generaron diferentes condiciones ambientales postfloración cada año. La información climática fue obtenida de una estación meteorológica situada a 20 metros del ensayo (Weather Monitor II, Davis, CA). Se registraron las temperaturas máximas y mínimas ($^{\circ}\text{C}$) y la radiación fotosintéticamente activa incidente (MJ m^{-2}) desde inicio de floración hasta madurez fisiológica ($\text{RFAinc Ac} = \sum \text{radiación solar incidente} \times 0,48$; Szeicz, 1974). Las condiciones ambientales prefloración de cada año pueden hallarse en la Tabla 3.3 del capítulo anterior.

4.2.2. Mediciones

Calidad final del grano

Todas las determinaciones de calidad final del grano se realizaron en el grano cosechado a madurez del cultivo (definida mediante el cambio a color marrón de

silicuas y tallos), sobre la muestra cosechada para estimar el rendimiento del cultivo (ver sección 3.2.2, Capítulo 3). Luego de cosechado, el grano fue secado durante 48hs en estufa a 60 °C para evitar cambios en su composición del grano que alterara la calidad. En el año 2006, las determinaciones de contenido de aceite, glucosinolatos y perfil de ácidos grasos fueron realizadas mediante macro-análisis en los laboratorios de la Cámara Arbitral de Cereales de Bahía Blanca, siendo necesario una mayor cantidad de grano para las determinaciones (50-70 gramos por muestra). Debido a la imposibilidad de alcanzar esa cantidad de grano en cada repetición, se obtuvo una muestra compuesta de cada tratamiento uniendo las tres repeticiones, y luego se extrajeron dos sub-muestras (pseudoréplicas) para su análisis. En los años 2007 y 2008, se realizaron micro-análisis en los laboratorios del Centro Regional de Investigaciones Científicas y Transferencia Tecnológica (CRILAR-CONICET, La Rioja), donde la cantidad de muestra necesaria era mucho menor. Esto permitió mantener la individualidad de las tres repeticiones por tratamiento (repeticiones verdaderas). En los tres años experimentales, el contenido de glucosinolatos y proteínas fueron determinados en la Cámara Arbitral de Bahía Blanca y en el laboratorio de Semillas del Departamento de Producción Vegetal (FAUBA), respectivamente.

El contenido de aceite del grano se estimó en el año 2006 en forma no destructiva por NMR (Resonancia Magnética Nuclear), mientras que en los años 2007 y 2008 se realizó mediante Soxhlet a partir de muestras de granos molidos (5-10 gramos) extraídas mediante circulación de hexano durante 8 h (IUPAC Método 1.122). En ambos casos, el % de aceite se expresó en base seca (0 % de humedad de grano). Las proteínas del grano se determinaron a través de digestión sulfúrica con el método micro-Kjeldahl (Nelson y Sommer, 1973) a partir de muestras de grano entero (2006) o sobre la harina desgrasada (residuo de grano molido de la extracción Soxhlet, en 2007 y 2008). Los valores de proteína se calcularon considerando los valores para el grano entero a partir de la siguiente ecuación: $\text{PRO grano (\%)} = \frac{\% \text{ PRO harina} (100 - \% \text{ AC grano})}{100}$, donde **PRO grano** es el porcentaje de proteína en grano entero, **PRO harina** es el porcentaje de proteína en la harina desgrasada y **% AC grano** es el porcentaje de aceite del grano. El contenido de glucosinolatos en el grano se cuantificó por cromatografía líquida (HPLC, ver más detalle en sección 2.2.2, Capítulo 2).

El perfil de ácidos grasos fue determinado por cromatografía de gases en el año 2006 (ver más detalle en sección 2.2.2, Capítulo 2), y en los años 2007 y 2008 de acuerdo al método oficial de UE (UEC, 1992). Este último, consistió en la determinación de la composición de ácidos grasos, previa metilación del aceite, utilizando un cromatógrafo Hewlett-Packard 5890 (Hewlett-Packard, Sacramento, CA) equipado con una columna capilar CP-Wax 52CB (Chromopack, Holanda) de 25 m de longitud y 0,25 mm D.I., sistema de inyección split y detector de ionización de llama (FID). Se utilizó hidrógeno como gas portador, y las temperaturas del inyector y detector fueron de 250 y 300 °C, respectivamente. Las temperaturas del horno se programaron a 180 °C por 5 minutos, luego 180-240 °C a 5 °C minuto⁻¹, finalmente 240 °C durante 10 min. Los ácidos grasos se identificaron mediante comparación de sus tiempos de retención con los de una mezcla estándar conocida (07756-1AMP, Sigma-Aldrich, St. Louise, MO). En los resultados se muestran los ácidos grasos saturados agrupados (SAT) e incluyen al ácido palmítico (16:0), esteárico (18:0), araquídico (20:0), behénico (22:0) y lignocérico (24:0).

Dinámica del peso seco y el perfil de ácidos grasos del grano

La caracterización de la evolución del peso seco del grano se realizó para ambos genotipos en los años 2007 y 2008, con el fin de describir la dinámica de acumulación

de materia seca del grano, el momento de ocurrencia de la fase de llenado efectivo del grano y la madurez fisiológica (MF), cuando finaliza la acumulación de materia seca del grano. De cada contenedor se seleccionaron 5-8 plantas de la bordura que sean homogéneas en ciclo ontogénico. Con intervalos de 5-7 días, se cosecharon 4 silicuas a partir de la silicua ubicada en la posición número 10 (contando desde la base) del tallo principal. Se definió este estrato de silicuas constante (11-14) para los muestreos, a fin de evitar tomar muestras de granos sometidos a diferentes condiciones ambientales durante su crecimiento. Los muestreos se iniciaron cuando la silicua n° 10 alcanzó unos 6 cm de largo, aproximadamente, lo que coincidió con el largo máximo de silicua y el inicio de la acumulación de materia seca en los granos, a los 13 días desde el inicio de floración, aproximadamente. Las muestras se colocaron en estufa a 50 °C por 48 hs, y luego se determinó el peso seco de los granos y el número de granos por silicua. El momento de ocurrencia de MF en el año 2006, se estimó a partir del tiempo térmico (temperatura base= 0 °C) entre IFI y MF para cada tratamiento en los años 2007 y 2008. Luego se obtuvo una duración en tiempo térmico promedio entre los dos años para cada tratamiento y genotipo, y se calculó esa suma térmica desde inicio de floración con las temperaturas medias del 2006.

La dinámica del perfil de ácidos grasos se realizó en los tratamientos N₀S₀ y N₁S₀ de ambos genotipos en los años 2007 y 2008, sobre las muestras extraídas para caracterizar la dinámica del peso seco del grano y con la misma metodología utilizada esos años para determinar el perfil de ácidos grasos en el grano a cosecha (UEC, 1992). En el primer y segundo muestreo de grano, el pequeño tamaño del grano no permitió tener muestra suficiente para el análisis en 2007, mientras que en 2008 se realizó una única determinación por tratamiento uniendo las tres repeticiones. A partir del 3^{er} muestreo de grano (20 días desde inicio de floración aproximadamente) fue posible caracterizar el perfil en las 3 repeticiones de cada tratamiento en ambos años.

Condiciones ambientales durante el llenado de los granos

A partir de los datos meteorológicos se estimaron las temperaturas medias y mínimas promedio durante la etapa de postfloración (desde inicio de floración hasta MF) para todos los tratamientos en los tres años de ensayo, así como también la radiación fotosintéticamente activa incidente acumulada (RFA_{inc} Ac en MJ m⁻²) durante esta misma etapa. Se relacionó el perfil de ácidos grasos del grano (18:1, 18:2, 18:3 y SAT) con las temperaturas y la RFA_{inc} Ac.

4.2.3. Análisis estadísticos

Los efectos de los tratamientos de fertilización sobre los atributos de calidad final del grano se analizaron mediante análisis de varianza (ANVA), incluyendo como factores el genotipo, los tratamientos de N y S y sus interacciones. Como ya fue indicado en el capítulo anterior, se realizaron análisis de varianza para cada año por separado, para analizar las diferencias entre tratamientos de fertilización y genotipos, debido a que los niveles de fertilización fueron diferentes entre años. A excepción del contenido de proteínas, el resto de los atributos de calidad medidos en el año 2006 no fueron incluidos en el análisis estadístico debido a la falta de repeticiones verdaderas. En aquellos casos donde se observaron efectos significativos de los tratamientos, el nivel de significancia entre las medias se comparó usando el test de Diferencias Mínimas Significativas (LSD, $\alpha = 0,05$). Se realizaron regresiones lineales simples a las relaciones entre atributos de calidad final del grano (*i.e.* % y mg grano⁻¹ de aceite y proteínas, rendimiento en aceite) y la disponibilidad de nitrógeno, así como también

para ciertos atributos de calidad entre sí (*i.e.* relaciones entre ácidos grasos, % y mg grano⁻¹ de aceite y proteína).

La dinámica de acumulación de peso seco del granos se ajustó a funciones lineales con punto de quiebre a las relaciones peso seco de grano/tiempo utilizando el programa TBL Curve (Jandel TBLCURVE, 1991). Inicialmente se utilizaron modelos de regresión tri-lineal para caracterizar la dinámica del peso del grano en forma conjunta para cada año experimental. El modelo utilizado fue el siguiente: $PG = a + bx (x \leq c) + bc + d * (x - c) (c < x \leq e) + d * (e - c) (x > e)$, donde **PG** es el peso seco del grano (mg), “**x**” indica los días desde inicio de floración, “**a**” es la ordenada al origen, “**b**” es la pendiente de la primer porción lineal (en mg grano día⁻¹), “**c**” es el primer punto de quiebre desconocido de la función (en días desde inicio de floración), “**d**” es la pendiente de la segunda porción lineal de la regresión (tomada como la tasa de llenado en mg grano día⁻¹), y “**e**” es el segundo punto de quiebre desconocido de la función (fin del llenado de los granos en días desde inicio de floración). Estos parámetros permitieron dividir la dinámica del llenado de los granos en tres fases: (i) *fase lag*, (ii) fase de *llenado efectivo* y (iii) fase de *post madurez fisiológica*; y caracterizar el momento de ocurrencia de fin de fase lag (parámetro “c”) y de madurez fisiológica (parámetro “e”). Para graficar conjuntamente la dinámica de los dos años experimentales, se relativizó el peso seco del grano al peso seco final obtenido cada año a partir del modelo tri-lineal, y la duración del llenado se relativizó al momento de madurez fisiológica (100 %). Se ajustó un modelo tri-lineal para describir la relación relativizada para ambos genotipos y años.

Para analizar el efecto de la fertilización sobre la dinámica de acumulación de peso seco del grano, se ajustaron modelos de regresión bi-lineal por tratamiento, eliminando del análisis los puntos ubicados entre inicio de floración y fin de la *fase lag* (según ajuste tri-lineal), debido a que la cantidad de puntos en esta fase resultaba insuficiente para realizar un ajuste tri-lineal confiable. El modelo utilizado se muestra en la siguiente ecuación: $PG = a + bx (x \leq c) + bc (x > c)$, donde **PG** es el peso seco del grano (mg), “**x**” son los días desde inicio de floración, “**a**” es la ordenada al origen, “**b**” es la pendiente de la regresión lineal (tomada como la tasa de llenado en mg grano día⁻¹), y “**c**” es el punto de quiebre desconocido de la función (fin del llenado de los granos en días desde inicio de floración). En los dos modelos, las diferencias significativas entre los parámetros (duraciones y tasas de llenado), se analizaron a través de sus intervalos de confianza ($p < 0,05$).

4.3. RESULTADOS

4.3.1. Calidad final del grano

La mayor disponibilidad de N redujo significativamente ($p < 0,05$) el contenido de aceite (%) y aumentó el de proteínas (%), sin embargo, debido a que la caída en el porcentaje de aceite fue menos que proporcional que el aumento en el rendimiento, el rendimiento en aceite en g m⁻² se incrementó ante la mayor oferta de nitrógeno (Tabla 4.1). El rendimiento en aceite aumentó en mayor medida en 2008 donde el nivel de fertilización fue mayor (279 kg N ha⁻¹) al pasar de N₀ a N₁ (64 % en promedio de ambos genotipos), mientras que en 2007 (201 kg N ha⁻¹) esos valores de incremento fueron de 28 %. Los glucosinolatos no manifestaron cambios por la fertilización, pero hubo diferencias genotípicas en 2008, con valores levemente superiores en *Filial UofA*, pero siempre muy por debajo del máximo permitido (*i.e.* 20 μmoles g⁻¹). En el año 2006, a

pesar de la falta de repeticiones verdaderas para incluirlo en los análisis estadísticos, los valores obtenidos y las tendencias por efecto del N (149 kg N ha^{-1}) sobre el contenido de aceite, el rendimiento de aceite y los glucosinolatos, son similares a lo observado en los otros dos años experimentales. Ninguna de estas variables de calidad del grano fue afectada por la oferta de S (hasta $69,4 \text{ kg S ha}^{-1}$), así como tampoco interacciones entre N y S (Tabla 4.1).

Tabla 4.1. Contenido de aceite en % (% AC), rendimiento de aceite en kg ha⁻¹ (Rto. AC), contenido de glucosinolatos en $\mu\text{moles g}^{-1}$ (GLU) y contenido de proteínas en % (% PRO) para todos los tratamientos de fertilización con N y S en dos genotipos (Filial UofA y Eclipse) y tres años (2006, 2007 y 2008). Los códigos de los tratamientos están descriptos en la Tabla 3.2. El año 2006, a excepción de %PRO, no fue incluido en el análisis estadístico por carecer de repeticiones verdaderas.

Año	Trata- miento	% AC (%)	Rto. AC (g m ⁻²)	GLU ($\mu\text{moles g}^{-1}$)	% PRO (%)
2006					
<i>Filial UofA</i>					
	N ₀ S ₀	48,4	139,3	4,60	18,9 d
	N ₀ S ₁	48,1	128,7	4,10	20,0 cd
	N ₁ S ₀	46,0	152,4	6,35	21,9 ab
	N ₁ S ₁	46,1	153,3	5,20	21,3 bc
<i>Eclipse</i>					
	N ₀ S ₀	49,3	108,7	5,35	19,7 d
	N ₀ S ₁	49,1	116,4	4,85	20,2 cd
	N ₁ S ₀	47,3	146,9	4,75	22,2 ab
	N ₁ S ₁	47,4	155,0	6,70	22,9 a
Nitrógeno (N)					***
Azufre (S)					NS
Genotipo (G)					*
NxS					NS
NxG					NS
SxG					NS
NxSxG					NS
2007					
<i>Filial UofA</i>					
	N ₀ S ₀	46,8 ab	116,3 c	4,70 a	17,8 bcd
	N ₀ S ₁	47,9 a	131,5 bc	4,37 a	17,2 d
	N ₁ S ₀	45,0 b	153,9 abc	4,47 a	19,2 ab
	N ₁ S ₁	45,8 b	163,3 ab	5,27 a	19,5 a
<i>Eclipse</i>					
	N ₀ S ₀	48,1 a	143,0 abc	3,67 a	17,7 cd
	N ₀ S ₁	48,0 a	115,4 c	3,53 a	17,4 d
	N ₁ S ₀	46,2 ab	179,7 a	4,07 a	19,0 abc
	N ₁ S ₁	46,1 ab	154,3 abc	2,93 a	19,6 a
Nitrógeno (N)					**
Azufre (S)					NS
Genotipo (G)					NS
NxS					NS
NxG					NS
SxG					NS
NxSxG					NS
2008					
<i>Filial UofA</i>					
	N ₀ S ₀	45,7 abc	130,5 b	3,30 a	20,2 c
	N ₀ S ₁	44,7 abc	123,8 b	3,33 a	20,7 bc
	N ₁ S ₀	43,6 bc	200,6 a	3,07 ab	22,6 ab
	N ₁ S ₁	44,1 bc	207,5 a	3,67 a	21,2 abc
<i>Eclipse</i>					
	N ₀ S ₀	46,7 ab	119,8 b	2,23 ab	20,6 bc
	N ₀ S ₁	48,0 a	124,3 b	1,63 b	19,3 c
	N ₁ S ₀	44,5 abc	202,0 a	2,20 ab	22,6 ab
	N ₁ S ₁	42,7 c	204,7 a	3,43 a	23,2 a
Nitrógeno (N)					**
Azufre (S)					NS
Genotipo (G)					NS
NxS					NS
NxG					NS
SxG					NS
NxSxG					NS

Nota: Letras distintas indican diferencias entre tratamientos de fertilización y genotipos dentro de cada año ($p < 0,05$). *, **, *** corresponden a $p < 0,05$; 0,01 y 0,001; respectivamente. NS: no significativo.

La creciente disponibilidad de N en los tres años de ensayo se asoció negativamente ($-0,016 \text{ \% kg N}^{-1}$, $R^2 = 0,67$) con el contenido de aceite y positivamente ($0,012 \text{ \% kg N}^{-1}$, $R^2 = 0,39$) con el contenido de proteína del grano en ambos casos en forma significativa ($p < 0,05$) (Figura 4.1). Al asociar el contenido de aceite del grano con el contenido de proteína, se halló una relación negativa ($\% \text{ aceite} = 57,75 - 0,56 \text{ \% proteína}$, $R^2 = 0,31$). La pendiente negativa de $-0,56$ indica que no hubo un reemplazo directo de aceite por proteína en el grano, ya que la caída en el porcentaje de aceite fue menos que proporcional que el aumento en el porcentaje de proteína generado por el aumento en la disponibilidad de N para el cultivo.

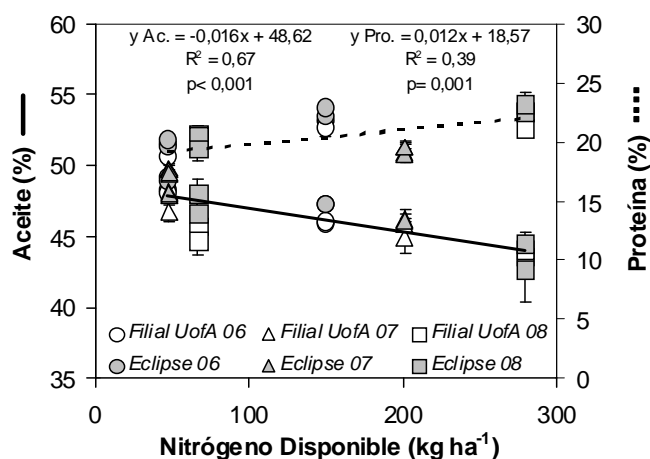


Fig. 4.1. Relación entre el contenido porcentual de aceite (línea llena) y de proteína (línea punteada) y el nitrógeno disponible (kg ha^{-1}), para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (Filial UofA con símbolos blancos y Eclipse con símbolos grises) en los tres años (2006, 2007 y 2008). Las barras de error muestran el error estándar.

A pesar de la relación negativa entre el contenido porcentual de aceite en grano y la disponibilidad de N, el incremento del rendimiento ocurrido por efecto del N fue de mayor magnitud y más que proporcional a la reducción del porcentaje de aceite (ver Figura 3.11 a, Capítulo 3), dando como resultado un aumento del rendimiento en aceite del cultivo (Figura 4.2). Este atributo se asoció linealmente con la disponibilidad de N, en todo el rango explorado de oferta de este nutriente en los tres años de ensayo, y no mostró diferencias entre genotipos ni por el agregado de S.

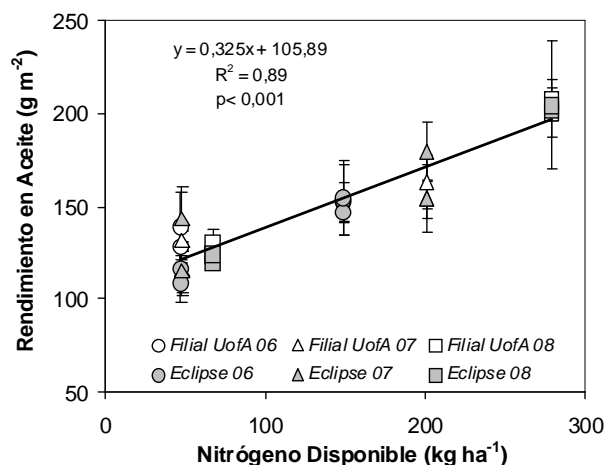


Fig. 4.2. Relación entre el rendimiento en aceite (g m^{-2}) y el nitrógeno disponible en kg ha^{-1} , para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (Filial UofA con símbolos blancos y Eclipse con símbolos grises) en los tres años (2006, 2007 y 2008). Las barras de error muestran el error estándar. Los tratamientos con S no mostraron diferencias respecto de N y por ello no se discriminan en la figura.

En términos absolutos por grano (mg grano^{-1}), el contenido de aceite y proteína se mantuvieron bastante estables ante cambios en la disponibilidad de N por hectárea, con débiles asociaciones para el aceite ($R^2 = 0,14$ y $p = 0,08$) y la proteína ($R^2 = 0,37$ y $p = 0,002$). Al asociar el contenido absoluto de aceite y proteína en el grano, no se halló relación entre ambos y los puntos estuvieron alejados de la relación 1:-1 (Figura 4.3 a), pero se observa un ordenamiento a la derecha de los tratamientos de mayor disponibilidad de N (0,57 vs. 0,63 $\text{mg proteína grano}^{-1}$, para N_0 vs. N_1). Al asociar el contenido absoluto de proteínas y el N disponible por grano (Figura 4.3 b), el contenido de proteínas sólo aumentó claramente con la mayor disponibilidad de N por grano en el rango de los tratamientos N_0 , con disponibilidades de N menores a 0,08 mg N grano^{-1} , resultando no significativa para los tratamientos N_1 . Los datos sugieren que las respuestas observadas podrían ser parte de una curva general de respuesta asintótica (línea cortada en Figura 4.3 b) a la disponibilidad de N por grano (tamaño de fuente N) y que los granos estarían limitados por N cuando poseen valores de N disponible por grano inferiores a 0,12-0,15 mg N grano^{-1} , aproximadamente.

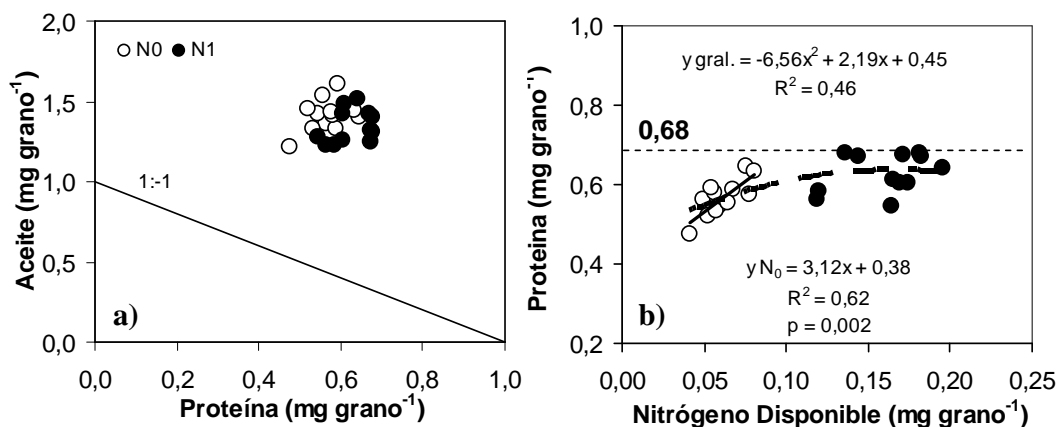


Fig. 4.3. Relación entre a) el contenido absoluto de aceite (mg grano⁻¹) y de proteína (mg grano⁻¹), y b) el contenido absoluto de proteína (mg grano⁻¹) y el nitrógeno disponible por grano (mg grano⁻¹), para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (Filial UofA y Eclipse) en los tres años de ensayo (2006, 2007 y 2008). Sólo se discriminan los tratamientos con nitrógeno (N₀ círculos blancos y N₁ círculos negros). La línea llena en a) muestra la relación 1:-1 (reemplazo perfecto de aceite por proteína). En b), la línea punteada indica el valor máximo observado de contenido de proteína en grano (0,68 mg grano⁻¹), la línea llena muestra el ajuste lineal para los tratamientos N₀ y la línea cortada es el ajuste cuadrático para N₀ y N₁.

La respuesta inversa entre el porcentaje de aceite y el de proteína también se observó al asociar estas variables con el rendimiento en grano (Figura 4.4). Nuevamente, el ajuste fue mejor para el aceite y no hubo diferencias genotípicas por el agregado de S en estas respuestas. La suma del contenido porcentual de aceite y proteínas resultó muy estable entre años, tratamientos y genotipos, con un valor promedio para los tres años de $66,7 \pm 2,8 \%$, y no se asoció significativamente ni con el N disponible ni con el rendimiento en grano (datos no mostrados).

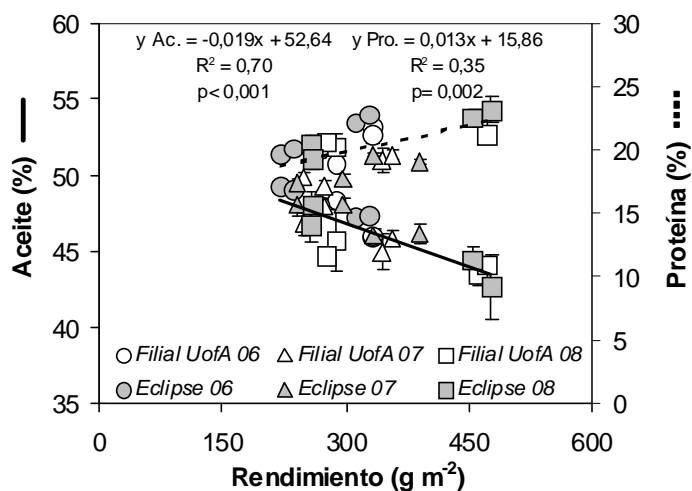


Fig. 4.4. Relación entre el contenido porcentual de aceite (línea llena) y proteína (línea punteada) y el rendimiento en grano en g m⁻² para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (Filial UofA con símbolos blancos y Eclipse con símbolos grises) en los tres años (2006, 2007 y 2008). Las barras de error muestran el error estándar.

El perfil de ácidos grasos del grano se mostró en general muy estable entre tratamientos de fertilización, genotipos y años (Tabla 4.2), y los cambios observados resultaron de muy pequeña magnitud, comparados con los cambios sobre el contenido

de aceite y de proteína del grano. Sólo existió un efecto por el agregado de N en los saturados (SAT) en el año 2007 y en el ácido linolénico (18:3) en el año 2008. Hubo diferencias significativas entre genotipos en el ácido linoleico (18:2) en ambos años y en oleico (18:1) y erúcico (22:1) en el 2007. El contenido de 18:1 y 18:2 siempre fue mayor en *Eclipse* respecto de *Filial UofA*, mientras que el 22:1 en el año 2007 fue mayor en *Filial UofA*. A pesar de estas ligeras diferencias, el contenido de erúcico permaneció en todos los casos bien por debajo del límite de 2 % requerido para aptitud comestible. En términos generales, para la mayoría de los ácidos grasos, hubo menores diferencias en el perfil ácido en el año de mayor agregado de N (2008).

Tabla 4.2. Contenido final de ácidos grasos saturados (SAT), ácido oleico (18:1), ácido linoleico (18:2), ácido linolénico (18:3) y ácido erúcico (22:1), todos como % del total, para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (Filial UofA y Eclipse) en los tres años (2006, 2007 y 2008). Los códigos de los tratamientos están descriptos en la Tabla 3.2. El año 2006 no fue incluido en el análisis estadístico por carecer de repeticiones verdaderas.

Año	Trata- miento	SAT (%)	18:1 (%)	18:2 (%)	18:3 (%)	22:1 (%)
2006						
<i>Filial UofA</i>						
	N ₀ S ₀	8,1	63,8	17,2	8,1	0,9
	N ₀ S ₁	8,2	64,1	17,2	8,3	0,4
	N ₁ S ₀	7,5	62,4	18,4	8,4	1,1
	N ₁ S ₁	8,1	62,4	17,6	8,1	1,4
<i>Eclipse</i>						
	N ₀ S ₀	7,6	64,5	18,3	8,4	0,0
	N ₀ S ₁	8,0	63,6	18,2	8,6	0,2
	N ₁ S ₀	7,6	63,0	18,9	9,3	0,0
	N ₁ S ₁	8,0	63,4	18,2	8,9	0,0
2007						
<i>Filial UofA</i>						
	N ₀ S ₀	7,23 ab	64,2 ab	16,0 bcd	10,0 a	0,6 ab
	N ₀ S ₁	7,17 bc	62,4 bc	15,8 cd	9,9 a	1,7 ab
	N ₁ S ₀	6,90 e	61,5 c	16,0 bcd	10,0 a	2,1 a
	N ₁ S ₁	6,93 de	64,6 ab	15,6 d	10,1 a	0,8 ab
<i>Eclipse</i>						
	N ₀ S ₀	7,37 a	64,4 ab	16,7 ab	9,9 a	0,1 b
	N ₀ S ₁	7,03 cd	64,4 ab	16,9 a	10,0 a	0,2 b
	N ₁ S ₀	7,20 bc	65,0 a	16,5 abc	9,9 a	0,0 b
	N ₁ S ₁	7,17 bc	64,5 ab	16,7 ab	9,9 a	0,2 b
	Nitrógeno (N)	***	NS	NS	NS	NS
	Azufre (S)	*	NS	NS	NS	NS
	Genotipo (G)	***	*	***	NS	**
	NxS	*	NS	NS	NS	NS
	NxG	**	NS	NS	NS	NS
	SxG	*	NS	NS	NS	NS
	NxSxG	NS	*	NS	NS	NS
2008						
<i>Filial UofA</i>						
	N ₀ S ₀	7,63 a	63,7 ab	17,6 b	8,0 ab	1,0 a
	N ₀ S ₁	7,37 a	62,3 b	17,5 b	8,2 ab	1,8 a
	N ₁ S ₀	7,37 a	63,5 ab	17,5 b	8,3 a	1,0 a
	N ₁ S ₁	7,37 a	65,4 a	17,3 b	8,2 ab	0,2 a
<i>Eclipse</i>						
	N ₀ S ₀	7,57 a	63,5 ab	19,7 a	7,8 b	0,1 a
	N ₀ S ₁	7,43 a	64,0 ab	19,2 a	7,8 b	0,1 a
	N ₁ S ₀	7,47 a	63,1 ab	19,6 a	8,3 ab	0,1 a
	N ₁ S ₁	7,33 a	63,7 ab	19,3 a	8,1 ab	0,1 a
	Nitrógeno (N)	NS	NS	NS	*	NS
	Azufre (S)	NS	NS	NS	NS	NS
	Genotipo (G)	NS	NS	***	NS	NS
	NxS	NS	NS	NS	NS	NS
	NxG	NS	NS	NS	NS	NS
	SxG	NS	NS	NS	NS	NS
	NxSxG	NS	NS	NS	NS	NS

Nota: Letras distintas indican diferencias entre tratamientos de fertilización y genotipos dentro de cada año ($p < 0,05$). *, **, *** corresponden a $p < 0,05$; 0,01 y 0,001; respectivamente. NS: no significativo.

Los ácidos grasos mayoritarios del aceite de colza-canola mostraron asociaciones con sus respectivos precursores, con algunos cambios entre genotipos (Figura 4.5). Como se esperaba, el ácido erúcico se redujo a medida que aumentó su precursor el ácido oleico en la variedad *Filial UofA*, mientras que en *Eclipse* no se obtuvo ninguna relación ya que los valores de erúcico siempre fueron muy bajos (Figura 4.5 a). El ácido linoleico se asocio negativamente con el contenido de su precursor oleico sólo en *Eclipse*, mientras que en *Filial UofA*, los puntos con alto erúcico mostraron estabilidad en el contenido de linoleico, lo que impidió relacionarlos (Figura 4.5 b). Por último, el ácido linolénico se asoció negativamente con su precursor linoleico en ambos genotipos, aunque la asociación fue mucho más débil en *Filial UofA* que en *Eclipse* (Figura 4.5 c). En esta última figura se observó un ordenamiento de los puntos según el genotipo y el año experimental, con mayores valores de linoleico para *Eclipse* en los tres años, y menores contenidos de linolénico en el año 2007, seguido por el 2006 y luego el 2008 en ambos genotipos. En conjunto, estos resultados indican la existencia de variabilidad en el perfil de ácidos grasos asociada tanto a cambios entre genotipos (Figura 4.5 a, b y c) como a cambios entre años (Figura 4.5 c).

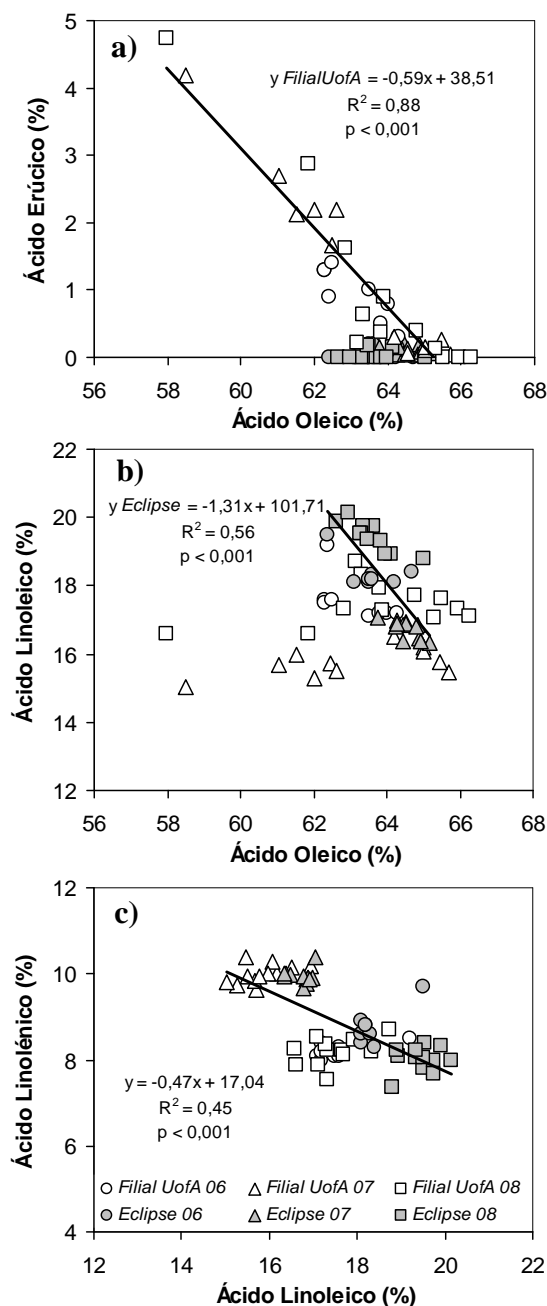


Fig. 4.5. Relación entre el contenido porcentual de a) ácido erúxico (22:1) y oleico (18:1); b) linoleico (18:2) y oleico (18:1), y c) linolénico (18:3) y linoleico (18:2) para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (Filial UofA con símbolos blancos y Eclipse con símbolos grises) en los tres años (2006, 2007 y 2008). La recta de ajuste en el panel a) incluyó sólo al genotipo Filial UofA, en el panel b) sólo al genotipo Eclipse y en el panel c) se estableció un único ajuste para ambos genotipos.

4.3.2. Dinámica del peso seco y el perfil de ácidos grasos de los granos

La dinámica del peso seco del grano se caracterizó para el estrato de silicuas 11-14 del tallo principal en 2007 y 2008 (Figura 4.6). Los dos años experimentales, ambos genotipos y todos los tratamientos se ajustaron a un único modelo tri-lineal por año, que permitió identificar tres sub-etapas: (i) la fase lag, que finalizó a los $18,1 \pm 0,73$ y $23,0 \pm 0,85$ días desde el inicio de la floración en 2007 y 2008, respectivamente; (ii) la fase

de *llenado efectivo*, que se caracterizó por tener tasas de llenado de $0,13 \pm 0,004$ y $0,16 \pm 0,006$ mg día⁻¹ en 2007 y 2008, respectivamente; y (iii) la fase de *post-madurez fisiológica*, que comenzó el día $38,2 \pm 0,45$ y $39,2 \pm 0,42$ desde el inicio de la floración en 2007 y 2008, respectivamente. Los pesos secos finales de ambos años y genotipos fueron iguales, con valores finales promedio de $3,11$ mg grano⁻¹. Expresada en tiempo térmico, la duración total del llenado (desde inicio de floración a madurez fisiológica) promedio de los cuatro tratamientos de fertilización fue de 745 ± 16 vs. 768 ± 10 °Cd, 683 ± 6 vs. 721 ± 14 °Cd y 780 ± 37 vs. 788 ± 10 °Cd para *Filial UofA* vs. *Eclipse* en 2006, 2007 y 2008, respectivamente.

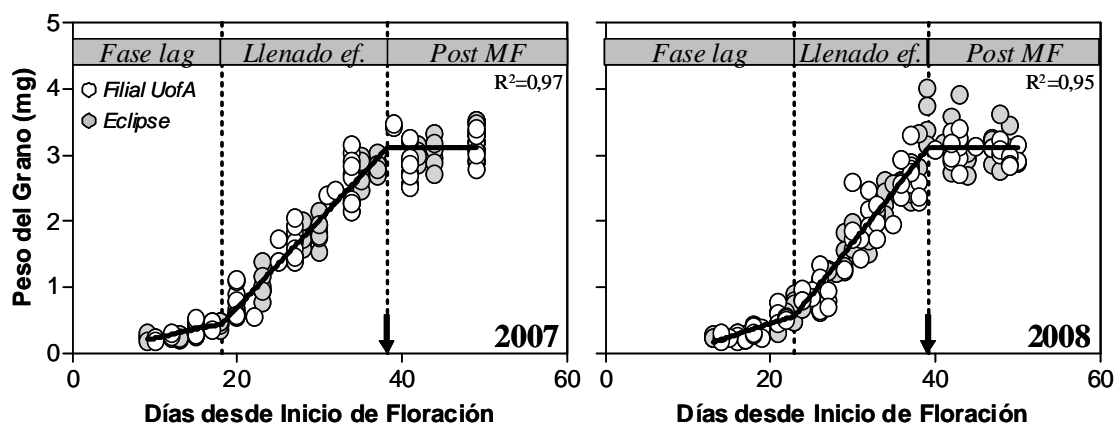


Fig. 4.6. Peso individual del grano (mg) en función de los días desde Inicio de Floración para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (*Filial UofA* con símbolos blancos y *Eclipse* con símbolos grises) en dos años (2007 y 2008). Las flechas indican los momentos de ocurrencia de madurez fisiológica (MF). Estrato de silicuas de la posición 11 a la 14.

Los ajustes por tratamiento a las relaciones peso de grano/tiempo permitieron corroborar la ausencia de diferencias significativas en las tasas de llenado, las duraciones y el peso seco final del grano entre genotipos y tratamientos de N y S (Tabla 4.3). Entre años tampoco se observaron cambios en los parámetros evaluados. De esta manera, la dinámica de acumulación de materia seca del grano en el estrato de silicuas 11-14 del tallo principal de colza-canola resultó muy estable ante cambios en la oferta de nutrientes y las condiciones ambientales durante el llenado. Por último, el peso seco final del grano fue explicado principalmente por cambios en tasa de llenado ($y = 0,065x - 0,061$; $R^2 = 0,21$; $p = 0,07$) más que por cambios en la duración del llenado ($y = -2,76x + 30,59$; $R^2 = 0,02$; $p = 0,59$), aunque para ambas variables los ajustes de las regresiones fueron bajos.

Tabla 4.3. Tasa de acumulación de peso seco del grano (mg día^{-1}), momento de ocurrencia de madurez fisiológica (días desde inicio de floración), peso seco final (mg) y duración del llenado efectivo (días) para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (Filial UofA y Eclipse) en dos años (2007 y 2008). Los valores entre paréntesis muestran el error estándar. Los códigos de los tratamientos están descriptos en la Tabla 3.2.

Año	Trata- miento	Tasa (mg día^{-1})	MF (día)	PS final (mg)	Llenado (días)
2007	<i>Filial UofA</i>				
	N ₀ S ₀	0,145 a	35,6 a	3,12 ($\pm 0,15$)	21,5
	N ₀ S ₁	0,152 a	37,1 a	3,18 ($\pm 0,09$)	20,8
	N ₁ S ₀	0,127 a	38,4 a	2,91 ($\pm 0,11$)	22,9
	N ₁ S ₁	0,125 a	36,9 a	3,04 ($\pm 0,11$)	24,4
	<i>Eclipse</i>				
	N ₀ S ₀	0,135 a	39,5 a	3,19 ($\pm 0,09$)	23,6
	N ₀ S ₁	0,133 a	39,7 a	3,30 ($\pm 0,07$)	24,8
	N ₁ S ₀	0,145 a	37,2 a	3,11 ($\pm 0,09$)	21,4
	N ₁ S ₁	0,124 a	39,3 a	3,04 ($\pm 0,10$)	24,6
2008	<i>Filial UofA</i>				
	N ₀ S ₀	0,170 a	38,0 b	3,13 ($\pm 0,02$)	18,3
	N ₀ S ₁	0,130 a	43,5 a	3,12 ($\pm 0,03$)	24,0
	N ₁ S ₀	0,146 a	40,7 ab	3,13 ($\pm 0,03$)	21,5
	N ₁ S ₁	0,148 a	37,8 ab	3,01 ($\pm 0,03$)	20,3
	<i>Eclipse</i>				
	N ₀ S ₀	0,146 a	39,0 ab	3,18 ($\pm 0,05$)	21,7
	N ₀ S ₁	0,150 a	41,1 ab	3,12 ($\pm 0,05$)	20,9
	N ₁ S ₀	0,152 a	39,9 ab	3,19 ($\pm 0,03$)	21,0
	N ₁ S ₁	0,170 a	39,6 ab	3,31 ($\pm 0,07$)	19,4

Nota: Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos de fertilización y genotipos dentro de cada año ($p < 0,05$). MF: madurez fisiológica.

Cuando la dinámica del peso seco del grano se calculó en términos relativos, respecto de su peso final alcanzado y la duración del periodo de llenado, esta también mostró tres fases (Figura 4.7). La *fase lag*, que se extendió hasta el 50,6 % de la duración del llenado, acumulándose en esta etapa sólo el 12,6 % del peso final del grano. La etapa de llenado efectivo ocupó el 49,4 % restante de la duración total del llenado, durante la cual el grano obtuvo el mayor incremento relativo de su peso final (*i.e.* el 87,4 % restante del peso).

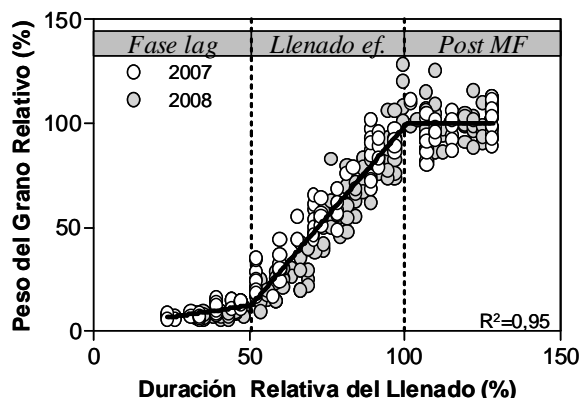


Fig. 4.7. Peso individual del grano relativo a su peso máximo (%) en función de la duración relativa del llenado (%) respecto del momento en que se alcanzó la madurez fisiológica para todos los tratamientos de fertilización y los dos genotipos utilizados (Filial UofA y Eclipse) en dos años (2007 con círculos blancos y 2008 con círculos grises). Los datos fueron tomados en granos correspondientes al estrato de silicuas de las posiciones 11 a 14.

Durante el crecimiento del grano, la dinámica de acumulación de los principales ácidos grasos del grano fue muy estable entre tratamientos de fertilización y genotipos (Figura 4.8). El perfil de ácidos grasos aumentó ligera y asintóticamente hasta cerca de MF, sin cambios significativos en la fase de post madurez fisiológica. Durante la fase de llenado efectivo, durante la cual el grano acumula el 80 % de su peso seco, el contenido de ácido oleico se incrementó ligeramente desde 50 a 65 %, aproximadamente, reduciéndose paralelamente el ácido linoleico en ambos años. El ácido linolénico mostró algunas diferencias entre años, ya que aumentó levemente en la primera mitad de la fase de llenado efectivo durante el año 2007, no mostrando cambios significativos en 2008.

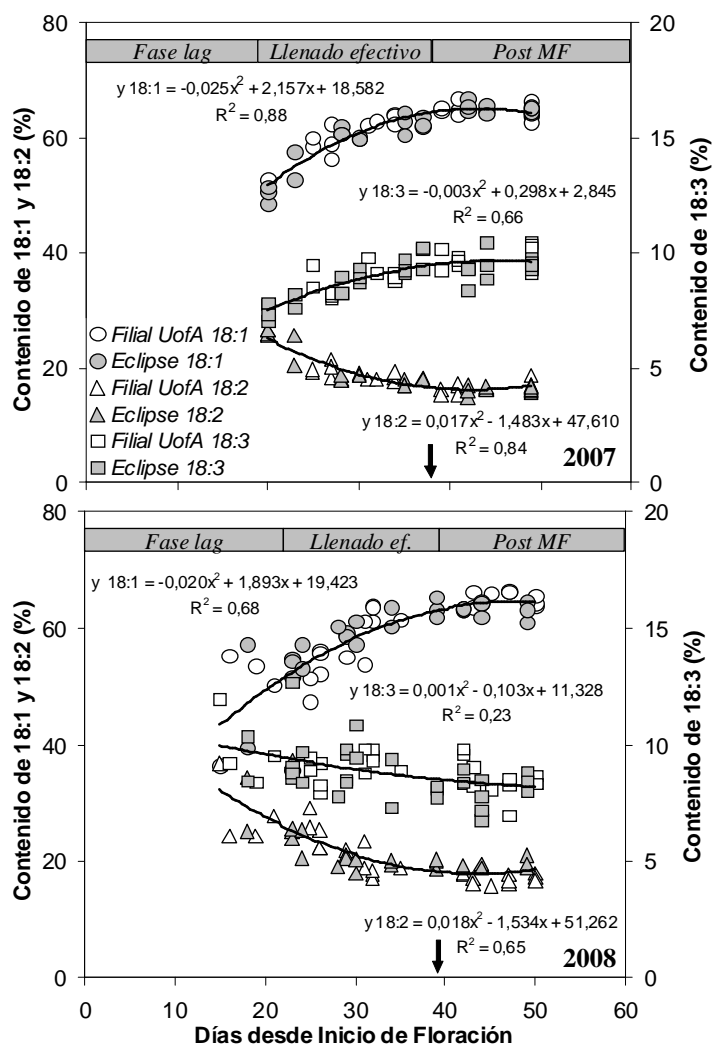


Fig. 4.8. Contenido de ácido oleico (18:1; \circ y \bullet), linoleico (18:2; Δ y \blacktriangle) y linolénico (18:3; \square y \blacksquare), expresados en porcentaje, en función de los días desde Inicio de Floración para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (Filial UofA con símbolos blancos y Eclipse con símbolos grises) en dos años de ensayo (2007 y 2008). Las flechas indican madurez fisiológica. Los datos fueron tomados en granos correspondientes al estrato de silicuas de las posiciones 11 a 14.

4.3.3. Respuestas de la calidad de grano a las condiciones ambientales postfloración

Los ambientes explorados por el cultivo durante la etapa de postfloración (desde inicio de floración hasta madurez fisiológica), durante en los tres años experimentales, fueron diferentes. Desde el punto de vista térmico, en el año 2007 el llenado de los granos ocurrió en el ambiente más frío, seguido por el 2008 y luego el 2006, con temperaturas mínimas promedios de todo el llenado en todos los tratamientos de $13,5 \pm 0,04$; $14,5 \pm 0,15$ y $15,3 \pm 0,16$ °C para 2007, 2008 y 2006, respectivamente. La radiación fotosintéticamente activa incidente acumulada (RFAinc Ac. en MJ m^{-2}) durante esta etapa también varió entre años en el mismo sentido que las temperaturas mínimas, de manera que el año más frío (*i.e.* 2007) también fue el año que en promedio para todos los tratamientos tuvo menor RFA acumulada, seguido por el 2008 y luego el 2006, con valores de $334 \pm 2,7$; $378 \pm 7,4$ y $419 \pm 5,1$ MJ m^{-2} para el 2007, 2008 y 2006, respectivamente. Esta menor radiación acumulada en el año ligeramente mas fresco se explica porque esa diferencia térmica de 1 °C de temperatura media durante la

etapa postfloración casi no modificó la duración en días de la etapa inicio de floración-madurez fisiológica (Figura 4.6).

Al relacionar el perfil de ácidos grasos con las temperaturas exploradas durante el llenado, el ácido linolénico y los ácidos grasos saturados fueron los que mostraron mayor asociación con la temperatura (Figura 4.9). Así, a mayor temperatura mínima (en los años 2008 y 2006), menor contenido de linolénico y mayor cantidad de ácidos grasos saturados, generando aceites con menor nivel de insaturación (Figura 4.9 a y c). Similares tendencias se observaron al asociar el perfil de ácidos grasos con el nivel de RFA incidente acumulada, aunque para el caso del 18:3, la relación estuvo fuertemente influenciada por los puntos del 2007, observándose pocos cambios para un amplio rango de RFA (entre 350 y 450 MJ m⁻²; Figura 4.9 b y d). A fin de separar el efecto de la fertilización nitrogenada del efecto ambiental, se realizaron las mismas regresiones incluyendo únicamente los tratamientos N₀ de cada año, obteniéndose las mismas tendencias mencionadas arriba (datos no mostrados).

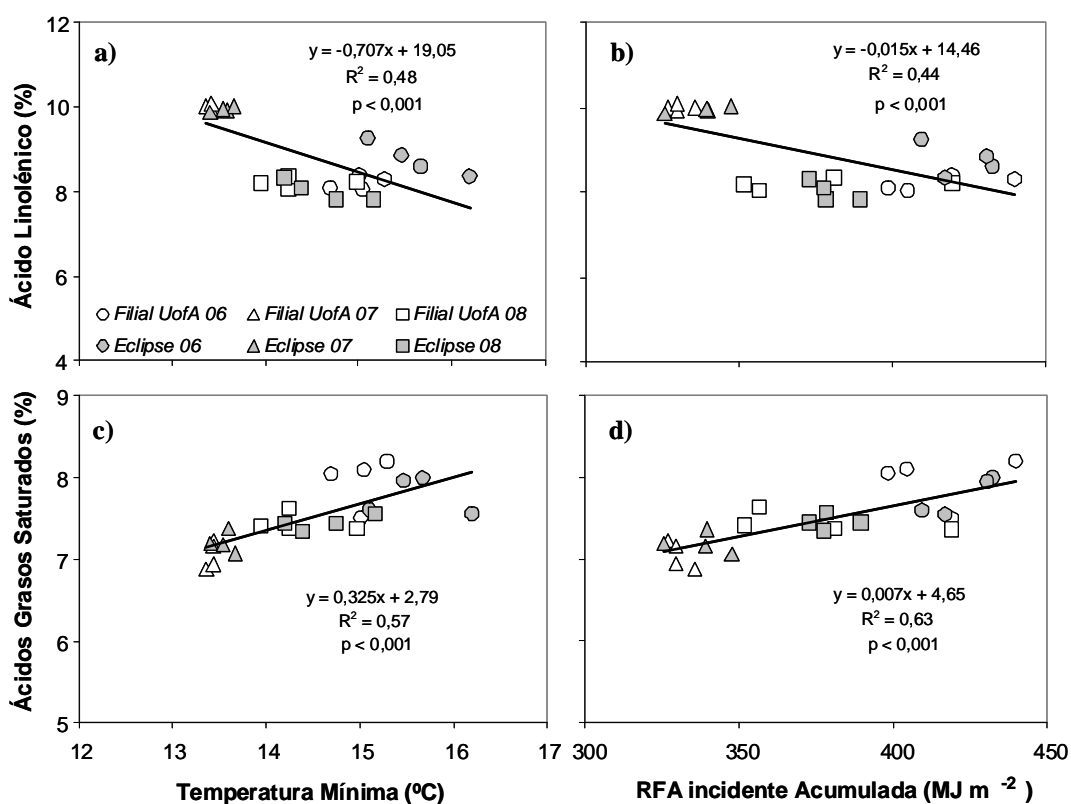


Fig. 4.9. Contenido porcentual de ácido linolénico (18:3) y de ácidos grasos saturados (SAT) en función de la temperatura mínima (°C) y la RFA incidente acumulada (MJ m⁻²) para todos los tratamientos de fertilización y dos genotipos (Filial UofA con símbolos blancos y Eclipse con símbolos grises) en los tres años (2006, 2007 y 2008).

4.4. DISCUSIÓN

En el presente capítulo se estudió el efecto de la fertilización con N y S sobre la calidad final del grano, en ensayos en contenedores bajo condiciones semi-controladas, utilizando dos genotipos primaverales medios, que han mostraron similar variabilidad en rendimiento y estabilidad en la calidad (Capítulo 2) y similar respuesta de la fisiología del rendimiento a la fertilización nitrógeno-azufrada (Capítulo 3). La

fertilización nitrogenada mostró un impacto de menor magnitud sobre la calidad final que el observado en el capítulo anterior sobre el rendimiento y sus componentes. Entre las variables de calidad de grano que respondieron a la disponibilidad de N, los contenidos porcentuales de aceite y proteína del grano fueron los atributos de calidad más sensibles en su respuesta a esta práctica de manejo (Tabla 4.1 y Figura 4.1).

Aumentos en el N disponible (hasta 279 kg N ha⁻¹), produjeron una caída lineal del contenido porcentual de aceite, mientras que por el contrario el rendimiento en aceite y la cantidad de proteína del grano (%) aumentaron linealmente (Figuras 4.1 y Figura 4.2). La falta de limitación de S en los tratamientos S₀ no generó diferencias en la síntesis de aceite del grano ni en la síntesis de proteína, entre tratamientos de S, en concordancia con lo hallado por Asare y Scarisbrick (1995) y contrariamente a lo indicado por Malhi *et al.* (2007). Las respuestas a la disponibilidad de N son coincidentes con lo observado por Triboi y Triboi-Blondel (2002), aunque las caídas del contenido de aceite observadas por estos autores fueron superiores, *i.e.* 2,5 % de aceite por cada 100 kg ha⁻¹ adicional de N, en comparación con el 1,6 % de aceite por cada 100 kg N ha⁻¹ en el presente trabajo (Figura 4.1). Varios trabajos, en condiciones a campo, también observaron aumentos del contenido de aceite y reducción del porcentaje de proteína con la disponibilidad de N (Brennan y Bolland, 2007; Hocking *et al.*, 1997; Asare y Scarisbrick, 1995), explorando rangos de N similares a las del presente trabajo (*i.e.* 0-140, 0-150 y 120-240 kg N aplicado ha⁻¹, para los tres trabajos respectivamente). Estos resultados parecen sugerir que una mayor oferta de N determina una mayor utilización del mismo para la síntesis proteica, lo cual en forma indirecta causa un detrimento de la concentración de aceite, mediado por un efecto parcial de dilución. Esta especulación está sostenida en (i) la respuesta positiva del porcentaje de proteína al aumento en la cantidad de N disponible por grano (la fuente de N) para valores < 0,12-0,15 mg N grano⁻¹, aproximadamente (Figura 4.3 b), y (ii) la relación negativa observada entre los contenidos porcentuales de aceite y proteína del grano, que en el presente trabajo tuvo una pendiente de -0,56 %, mostrando un reemplazo parcial de ambos componentes por agregado de N, y una relación muy estable del total de aceite+proteína, en torno al 67 % (Tabla 4.1). Los cambios en el porcentaje de aceite y proteína no respondieron como un simple reemplazo, indicado por el hecho de que la caída en aceite fue menos que proporcional que el aumento relativo de la proteína. Esta falta de compensación entre el contenido de aceite y proteína en colza-canola también fue hallada por Peltonen-Sainio *et al.* (2011), quienes atribuyen este fenómeno a que el mejoramiento en esta especie inicialmente se orientó a incrementar el contenido de aceite y no el de proteínas. Triboi-Blondel y Renard (1999) analizando el efecto de la temperatura y el estrés hídrico sobre la calidad, también hallaron una relación negativa entre el contenido de aceite y proteínas, pero con una pendiente un poco más pronunciada (*i.e.* -0,85 % aceite % proteína⁻¹). Valores aún más altos de caída (*ca.* -1,5) se obtuvieron también al modificar fechas de siembra (Vilariño *et al.*, 2009) y al aplicar tratamientos de sombreado intenso post-floración (Rondanini *et al.*, 2010), que limitaron la capacidad de generar fotoasimilados (fuente de C). Por otro lado, Si *et al.* (2003) obtuvieron resultados similares a los del presente capítulo, ya que las pendientes de las relaciones negativas entre los porcentajes de aceite y proteína fueron de -0,37 a -0,64 % aceite % proteína⁻¹ en dos años de análisis, incluyendo varios genotipos y localidades australianas, y también obtuvieron un valor remarcablemente constante de 67 % para la suma de aceite y proteína. Así, los resultados parecen señalar que, independientemente del factor que modifique la calidad del grano (*e.g.* fertilización nitrogenada, temperatura, estrés hídrico, genotipo, etc.), tanto el contenido porcentual de aceite como el de proteína se ven afectados, siempre de manera inversa entre sí. Sin embargo, no

parece producirse un reemplazo perfecto entre ambos componentes (ya que las pendiente se alejan de la relación 1:1) y con distinta magnitud de cambio (menor o mayor que -1) de acuerdo con la limitación del metabolismo del grano considerada (fuente de carbono y/o de N), siendo la suma de ambos componentes (% de aceite + proteína) muy constante.

El análisis de los contenidos absolutos (mg grano^{-1}) de aceite y proteína ante cambios en la disponibilidad de N permitió hacer un análisis más certero de los metabolismos de C y N (Figura 4.3), ya que los cambios porcentuales no permiten separar con claridad ambos compuestos. En este sentido, la falta de asociación entre los contenidos absolutos de aceite y proteína (Figura 4.3 a) confirma que, al igual que lo observado en términos relativos, no ocurrió un reemplazo total de un componente por otro. Si bien la fertilización nitrogenada aumentó el contenido de proteína, este aumento fue de muy poca magnitud ($0,5$ a $0,7 \text{ mg grano}^{-1}$) comparado con el amplio rango de N disponible (rango de 47 a 279 kg N ha^{-1} en los tres años), y se hizo notorio en las situaciones de baja disponibilidad de nitrógeno (N_0) en un rango bajo de N disponible por grano ($<0,08 \text{ mg N grano}^{-1}$; Figura 4.3 b), donde sí se afectó la capacidad de síntesis de la proteína. Las variaciones observadas en la Figura 4.3 b podrían pertenecer a una curva asintótica de respuesta del contenido de proteína a la disponibilidad de N por grano, que requiere ser confirmada en futuros ensayos que exploren todo el rango de N por grano (de 0 a $0,20 \text{ mg N grano}^{-1}$). Esto podría lograrse mediante experimentos a escala de cultivo con fertilizaciones foliares en post-floración, para asegurar su rápida absorción, que aumentarían la cantidad de N disponible para un rango menos variable de número de granos. Alternativamente podrían removerse granos en floración para aumentar la cantidad de N disponible por grano, en forma similar a lo realizado en trigo por Martre *et al.* (2003). Además, a escala de planta se podrían realizar estudios aplicando la técnica de delta N^{15} que permite cuantificar la partición de N absorbido a grano con mayor nivel de detalle (Dubousset *et al.*, 2010; Abdallah *et al.*, 2010). Extender estos estudios de fertilización a distintas etapas post-floración permitiría analizar con detalle la incorporación de N a diferentes tipos de proteínas del grano (metabólicas, de reserva), que en trigo han exhibido diferentes dinámicas parciales de acumulación en el grano y distinta limitación por fuente (de reserva) o destino (metabólicas) (Martre *et al.*, 2003; 2006).

Los ácidos grasos mayoritarios que componen el aceite de colza-canola no manifestaron cambios significativos con la oferta nutricional del cultivo (Tabla 4.2), al igual que lo hallado por Ibrahim *et al.* (1989). Si bien en el primer año de ensayo pareció existir una tendencia similar a la encontrada por Behrens (2002) y Gao *et al.* (2010), con aumentos del nivel de instauración con mayor disponibilidad de N, dicha tendencia no fue observada en los siguientes dos años experimentales, con mayores aportes de N. La dinámica de acumulación de los principales ácidos grasos tampoco se modificó al aumentar la oferta nutricional (Figura 4.8). De manera similar, no se observaron cambios de gran magnitud en el perfil de ácidos grasos del aceite de colza-canola en el amplio rango de genotipos comerciales ante cambios en la fenología y las condiciones ambientales exploradas postfloración tal como se describió en el Capítulo 2 de esta tesis. Por ello, es posible concluir que el perfil de ácidos grasos muestra ser muy estable ante cambios en la fertilización del cultivo durante todo el ciclo, siendo la estabilidad de la composición del aceite una característica positiva de todos los genotipos de colza-canola actualmente cultivados en el país.

Las relaciones entre algunos ácidos grasos, precursores en su biosíntesis, mostraron cierta variabilidad genotípica y anual (Figura 4.5). La variabilidad genotípica estuvo dada por algunas repeticiones en los tres años de *Filial UofA* que mostraron altos

contenidos de ácido erúico (1-5%), bajo oleico y linoleico (símbolos a la izquierda en Figura 4.5 a y b). En esas situaciones, se favoreció la vía de síntesis del 22:1 a partir del 18:1, en lugar de la vía normal de síntesis (18:1 a 18:2, y luego 18:3). Esto alteró las relaciones que típicamente se esperan entre estos ácidos grasos (nula relación entre 22:1 y 18:1, y relación negativa entre 18:2 y 18:1), que sí se observaron en *Eclipse*, y en ambos genotipos, si se excluyen los puntos de *Filial UofA* con >1% de 22:1 (datos no mostrados). Estos valores atípicos de perfil de *Filial UofA* estarían asociados a una contaminación del grano provisto por la empresa que lo comercializa, ya que al caracterizar el perfil de ácidos grasos de la semilla sembrada en los ensayos, se observó que la misma tenía importantes niveles de ácido erúico (1,29 % y 1,07 % para la semilla utilizada en los ensayos del 2007 y 2008, respectivamente). La contaminación del grano puede ser el resultado del flujo de polen de otras plantas (generalmente malezas) del género *Brassica* (Rieger *et al.*, 2002) o por la cosecha del grano de estas malezas con alto contenido de erúico junto con el grano de colza-canola (Colbach *et al.*, 2001a, b). En Argentina, la producción de semilla comercial libre de contaminación es un objetivo buscado, aunque no siempre logrado por los semilleros, debido a la particular biología floral de colza-canola (30 % de polinización abierta y 70 % de autofecundación; Olsson, 1960) y la gran cantidad de malezas botánicamente relacionadas, capaces de contaminar la semilla. En colza-canola se requiere contar con semilla de calidad certificada que asegure la pureza varietal para permitir la exitosa y sostenida expansión del cultivo en el país.

El ácido linolénico (18:3) y los ácidos grasos saturados no son componentes mayoritarios en colza-canola, pero tienen importancia nutricional en el aceite y mostraron particular sensibilidad a las condiciones ambientales, especialmente con las temperaturas mínimas y la RFA incidente acumulada durante el llenado (Figura 4.9). La relación negativa hallada entre las temperaturas mínimas y el contenido de ácido linolénico es coincidente con lo hallado por Baux *et al.* (2008) y Merrien (2005) en colza-canola y por Izquierdo *et al.* (2002) en girasol, aunque en este último cultivo el ácido linoleico fue el más sensible de los ácidos grasos a los cambios térmicos nocturnos. Este proceso ha sido explicado a nivel bioquímico por la ocurrencia de procesos de termo-regulación de las enzimas desaturasas en granos (Hill *et al.*, 2003; Garcés *et al.*, 1992). Un efecto indirecto de las temperaturas sobre los ácidos grasos, podría operar a través de la modificación de la duración del llenado alterando la cantidad de radiación incidente acumulada. Sin embargo, los resultados de la Figura 4.9 no muestran una relación indirecta entre temperatura y radiación acumulada, sugiriendo un efecto directo de la primera. Los cambios en los ácidos grasos saturados fueron explicados en mayor medida por la RFA incidente (Figura 4.9 d), mientras que en otros trabajos se asoció fuertemente con el ácido oleico (Izquierdo *et al.*, 2009), y se contraponen con datos de Trémolières *et al.* (1982), quienes en cámaras de crecimiento no hallaron cambios en colza-canola en ninguno de los ácidos grasos ante cambios en la radiación. Si bien en el presente trabajo no fue posible independizar totalmente el efecto de las condiciones ambientales y de la fertilización sobre la calidad final del grano, el hecho de haber encontrado iguales tendencias a las de la Figura 4.9 al analizar los tratamientos controles de N (N_0), y que la temperatura y radiación de los tres años (2007<2008<2006) no se hayan ordenado del mismo modo que las dosis crecientes de N (2006<2007<2008), permiten suponer que los cambios en la calidad final del grano entre años no se debieron a la fertilización, sino al clima experimentado durante el llenado (temperatura y radiación). De todos modos, estos cambios resultaron de muy pequeña magnitud, y reafirman la idea de que el perfil de ácidos grasos en colza-canola

es muy estable a las condiciones ambientales (observado en Capítulo 2 de esta tesis) y a la fertilización (Tabla 4.2).

La dinámica de acumulación de materia seca en el grano en el estrato de silicuas 11-14 del tallo principal fue muy estable entre tratamientos de fertilización, genotipos y años, alcanzando todos los tratamientos similares duraciones del llenado y pesos finales de grano (Figura 4.6 y Tabla 4.3). Por tal motivo se pudieron unificar todos los tratamientos en los dos años evaluados a través la evolución relativa del peso del grano y la duración relativa del llenado (Figura 4.7). La *fase lag* resultó ser muy extensa, abarcando el 50 % del llenado, similar a lo hallado anteriormente en colza-canola primaveral (Elias y Copeland, 2001) y en soja (Egli, 1998), y resultó bastante más larga que la observada en trigo y maíz (*ca.* de un 30 % del llenado; Egli, 1998). El mayor crecimiento del grano (87 % de su peso final) ocurrió en la segunda mitad del llenado (fase de llenado efectivo), estando su peso final determinado en mayor medida por cambios en la tasa de llenado, que en la duración del llenado, al igual que lo descrito por Egli (1998) al comparar tasas y duraciones del llenado con los pesos máximos del grano de 13 cultivos (cereales y oleaginosas). La ocurrencia de MF de toda la planta estará levemente retrasada respecto a este estrato de silicuas.

Contrariamente a lo esperado, el contenido de glucosinolatos del grano no se modificó por el agregado de N ni S (Tabla 4.1). En el presente trabajo, la falta de limitación por S en los tratamientos S_0 no permitió sacar conclusiones sobre el efecto de este nutriente sobre el contenido de glucosinolatos. Sin embargo, los estudios que han abordado el efecto del S sobre los glucosinolatos muestran resultados contradictorios. Malhi *et al.* (2007), hallaron incrementos sólo en genotipos de *Brassica juncea* con altos contenidos de glucosinolatos (*ca.* 10-50 $\mu\text{moles g}^{-1}$), mientras que no hubo respuesta en un genotipo de *B. juncea* y *B. napus* 00 (bajo en erúico y glucosinolatos). Por otro lado, Fismes *et al.* (2000) si hallaron aumentos en el nivel de glucosinolatos en respuesta al S en genotipos de *B. napus* genéticamente definidos como bajos en glucosinolatos. Los rangos de S evaluados en estos trabajos fueron de 0-40 a la siembra y 0-75 kg ha^{-1} S aplicado en dos dosis al inicio del ciclo, en Malhi *et al.* (2007) y Fismes *et al.* (2000), respectivamente. Claramente serán necesarios más estudios al respecto que permitan identificar el origen de las diferentes respuestas al S, y que exploren dosis de S muy bajas, que aseguren una limitación de este nutriente para el cultivo en los tratamientos controles.

4.5. CONCLUSIONES

Los resultados del presente capítulo muestran, en concordancia con los obtenidos en el Capítulo 2, que es posible producir bajo condiciones ambientales favorables de Argentina, un aceite de colza-canola con buen contenido de aceite ($46,3 \pm 0,3$ %) y proteína ($20,2 \pm 0,2\%$), y de alta calidad para su uso alimenticio (bajo contenido de glucosinolatos y ácido erúico), aunque estos últimos atributos presentaron alguna variabilidad genotípica, asociado probablemente a contaminación en origen de la semilla sembrada. En cuanto al perfil de ácidos grasos, tuvo en promedio para todos los tratamientos y años un 7,4 % de saturados, 63,7 % de oleico, 17,5 % de linoleico y 8,9 % de linolénico, similar al perfil promedio de varios genotipos observado en el Capítulo 2 de esta tesis, demostrando la gran estabilidad de este atributo. Esto resulta una importante ventaja especialmente para lograr competitividad en el mercado internacional de granos y de aceite.

La fertilización nitrogenada mostró ser una estrategia válida para optimizar el rendimiento en aceite (kg ha^{-1}) a través de un importante efecto positivo sobre el rendimiento en grano (Capítulo 3) y un efecto negativo de menor magnitud sobre el % de aceite (Fig. 4.1), sin riesgo de modificar de manera importante la calidad comercial del grano (*i.e.* contenido de glucosinolatos y ácido erúxico). Sin embargo, será necesario considerar el impacto negativo de la aplicación de N sobre el contenido porcentual de aceite ($-1,6\%$ cada 100 kg N ha^{-1}), para evitar una menor bonificación o que el mismo caiga por debajo de la base de comercialización, especialmente en situaciones donde se esperen porcentajes de aceite bajos debido a limitantes genotípicas y ambientes (fechas de siembra tardías, temperaturas elevadas postfloración, Capítulo 2).

Al igual que lo ocurrido en el Capítulo 3 de esta tesis, no se ha podido describir el impacto del S sobre la calidad final del grano, ni la interacción $\text{N} \times \text{S}$, debido a la elevada disponibilidad de este nutriente en los tratamientos testigos en los tres años de ensayo. Sin embargo, debido a la escasa magnitud de los cambios provocados por el N sobre las variables de calidad evaluadas, en comparación con los cambios ocurridos por este elemento en las variables de rendimiento (Capítulo 3), es probable que el efecto del azufre sobre la calidad final del grano también resulte poco relevante.

En el presente capítulo se analizó el impacto de la fertilización con nitrógeno y azufre y las condiciones ambientales durante la etapa postfloración sobre la calidad final del grano, la dinámica de acumulación del peso seco del grano y de los principales ácidos grasos del grano en dos genotipos (variedad e híbrido) primaverales medios de colza-canola disponibles en Argentina, analizados anteriormente en los Capítulos 2 y 3 de esta tesis. En el siguiente capítulo se abordará la Discusión General de la tesis, donde se discutirán los principales aportes originales al conocimiento de los temas en estudio, se evaluarán las implicancias prácticas de los hallazgos efectuados y se propondrán algunos lineamientos para futuras investigaciones en relación a los principales aspectos no resueltos en esta tesis. Asimismo se realizará el contraste de los resultados obtenidos con las hipótesis planteadas en el Capítulo 1 y se describirán las Conclusiones Generales de la tesis.

- 5.1. Síntesis de los resultados obtenidos y contraste de hipótesis
 - 5.1.1. Estrategias para maximizar el rendimiento en grano
 - Elección de genotipos para maximizar el rendimiento
 - Fertilización con N y S para maximizar el rendimiento
 - 5.1.2. Estrategias para maximizar la calidad del grano
 - Elección de genotipos para maximizar la calidad
 - Fertilización con N y S para maximizar la calidad
- 5.2. Aspectos no resueltos, interrogantes planteados e investigaciones futuras
- 5.3. Conclusiones generales

5.1. SÍNTESIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS Y CONTRASTE DE HIPÓTESIS

La discusión global de los principales resultados obtenidos en el presente trabajo comenzará abordando las estrategias de manejo agronómico tendientes a maximizar por un lado el rendimiento, y por el otro, la calidad del grano de colza-canola, los cuales conllevan a la maximización del beneficio económico del cultivo.

5.1.1. Estrategias para maximizar el rendimiento en grano

A pesar de la importancia a nivel mundial del cultivo de colza-canola, en Argentina tiene aún una difusión muy limitada, representando un 0,13 % de la superficie agrícola del país en los años de mayor adopción. Una de las causas más importantes de la escasa adopción de este cultivo por parte de productores es el bajo rendimiento promedio nacional logrado a nivel de producción (1440 kg ha^{-1} ; MAGyP, 2010), en general asociado a decisiones de manejo que no siempre tienen en cuenta las respuestas de los procesos fisiológicos involucrados. Entre los errores más comunes están (i) la incorrecta elección de los genotipos utilizados, en especial la utilización de genotipos invernales en zonas del país con inviernos templados, donde no llegan a florecer por no cumplir los requerimientos de frío o se prolongan demasiado los ciclos coincidiendo el llenado con altas temperaturas; (ii) atrasos excesivos en las fechas de siembra, pudiendo generar fracasos en la implantación del cultivo por la ocurrencia de heladas intensas durante la etapa inicial del ciclo y/o una oferta ambiental inadecuada en postfloración; (iii) desconocimiento de los niveles fisiológicos y económicos de fertilización que maximizan el rendimiento, haciendo un uso menos eficiente de esta práctica costosa que ocupa entre el 40-60 % de los costos directos del cultivo, e (iv) importantes pérdidas de cosecha, debido a cosechas tardías con las silicuas demasiado secas y de fácil dehiscencia, o a dificultades tecnológicas tanto en cosecha directa como en corte e hilerado (Bragachini *et al.*, 1991). Si bien estas cuestiones son conocidas en forma difusa por muchos técnicos asesores del cultivo en el país, no existe suficiente cuantificación del impacto de estas decisiones sobre el rendimiento. Así, la incertidumbre acerca del rendimiento esperado en colza-canola, sumado a una pobre estructura local de comercialización y la imposibilidad de fijar precios, hace que los márgenes económicos del cultivo pueden ser inferiores a otros cultivos invernales como el trigo y la cebada, resultando poco atractivo para los productores que optan por no incorporarlo en sus rotaciones (Sfascia, 2009). Por ello, para aumentar los márgenes económicos y lograr una mayor difusión del cultivo a nivel nacional, es fundamental el desarrollo de estrategias de manejo locales que tiendan a maximizar el rendimiento en grano de colza-canola. Esta tesis de maestría se ha enfocado sobre dos de estas estrategias de manejo para maximizar el rendimiento: elección de genotipos y fertilización con N y S.

Elección de genotipos para maximizar el rendimiento

La disponibilidad de genotipos de colza-canola en Argentina es amplia, con varias empresas que los comercializan (seis al momento de realizar este trabajo) y con genotipos de muy diversos orígenes (Canadá, Australia, Suecia, Francia, Alemania, Estados Unidos), ya que no existen planes de mejoramiento local del cultivo. En los últimos 3 años el INTA fue generando mayor información sobre la fenología y el rendimiento de genotipos locales, primaverales e invernales, en 7 (2006), 9 (2007) y 11 (2008) localidades del país, mostrando una gran variabilidad en rendimiento entre

genotipos y zonas, hasta 32 % de CV entre genotipos (Iriarte *et al.*, 2008; 2007; 2006). En el Capítulo 2 de esta tesis, evaluando 20-24 genotipos durante dos años consecutivos en una misma localidad (Buenos Aires) en siembras de fin de mayo y fin de abril, se observó una gran variabilidad en rendimiento (710 a 4500 kg ha⁻¹; Figura 2.3 y Tabla 2.3) y en fenología (141 a 226 días desde E-MF; Figura 2.1) para los materiales evaluados, con mayores diferencias entre ellos en el año 2008 cuando la siembra fue más temprana. Los genotipos también manifestaron cambios en la duración de la etapa pre (82 a 168 días) y postfloración (36 a 81 días), aunque las mayores diferencias se expresaron en la etapa de prefloración dentro de cada año en particular (Figura 2.1 y Figura 2.2), modificando fuertemente el momento de ocurrencia de inicio de floración (Tabla 2.3) y con ello las temperaturas exploradas durante el período crítico de determinación del rendimiento (0-350 °Cd desde inicio de floración) y toda la etapa de postfloración (IFl-MF). El rendimiento mostró una relación negativa con las temperaturas de todo el llenado (Tabla 2.6) y del período crítico (Figura 2.7 a), de manera que la elección del genotipo debe ir acompañada de una correcta decisión de fecha de siembra para que el llenado de los granos ocurra con menores temperaturas, que maximizan el rendimiento.

En el Capítulo 2 se intentó generar para colza-canola un modelo que permita estimar el rendimiento a través del coeficiente fototermal (Q), al igual que en trigo, cebada, arveja y girasol (Arisnabarreta y Miralles, 2008; Poggio *et al.*, 2005; Cantagallo *et al.*, 1997; Magrin *et al.*, 1993; Fischer, 1985). Sin embargo, el modelo generado no permitió explicar los cambios en rendimiento a través del Q (Figura 2.7 c). La temperatura media durante el PCr se relacionó fuertemente con el rendimiento (Figura 2.7 a), pero existió una covariación entre temperatura y radiación que determinó una respuesta atípica del rendimiento con la radiación (Figura 2.7 b), lo cual explicó en parte la ausencia de asociación entre el rendimiento y el Q. Ya fueron discutidas otras posibles causas de la falta de ajuste del Q en este cultivo, *i.e.* la longitud del período crítico, la biología floral, temperaturas supra-óptimas, pero además de estas cuestiones, una posibilidad adicional es que el PCr considerado para el cálculo del Q no sea el adecuado para ser usado en forma genérica para todos los materiales. Varios autores coinciden en que dicho período comienza en inicio de floración (Diepenbrock, 2000; Mendham *et al.*, 1981; Mingeau, 1974), pero considerar una suma térmica fija tanto en genotipos primaverales cortos (PC) como invernales (INV), los cuales tienen diferente duración de la etapa postfloración, hace que este período represente en los genotipos locales entre un 30 y 50 % de la duración total de la etapa de postfloración, de manera que posiblemente abarque diferentes momentos de desarrollo y/o crecimiento entre genotipos con diferente hábito de crecimiento. Además, esta cuantificación del PCr fue realizada en genotipos invernales (Habekotté, 1997b), por lo que es probable que en los materiales primaverales la duración expresada en TT sea algo menor. Por lo tanto, será necesario definir con mayor precisión el momento de ocurrencia del período crítico en los genotipos locales, especialmente primaverales para los cuales no hay aún información disponible. Esto puede lograrse mediante experimentación directa aplicando estreses en diferentes etapas del cultivo, y existen estudios de este tipo en marcha en el país (Apella, 2010; Rondanini, 2010). Otra aproximación posible para definir el período crítico en colza-canola es la aplicación de métodos de cálculo por iteración a una base de datos de rendimiento y condiciones de temperatura y radiación diarias, hallando el período que optimice la relación rendimiento/Q. Similar aproximación fue aplicada con éxito en el cultivo de girasol por Izquierdo *et al.* (2006) y podría aplicarse en colza-canola a una base de datos más amplia que la generada en el Capítulo 2 de esta tesis, para lo cual sería necesario reunir información de otras fuentes,

como la red de evaluación de cultivares de colza-canola del INTA y los ensayos comparativos de rendimiento de semilleros y empresas privadas. Contar con esta información permitirá realizar estudios ecofisiológicos que permitan comprender la relación entre el rendimiento y el Q en ventanas de desarrollo apropiadas para el cultivo colza-canola.

Como se mencionó anteriormente, y al igual que en trigo, en el cultivo de colza-canola existen genotipos de ciclo primaveral e invernal, relacionados con los requerimientos de vernalización (Jedel *et al.*, 1986). El hecho de que en países como Francia, Alemania y Reino Unido, donde se utilizan genotipos invernales y se obtienen altos rendimientos como media nacional (3500 kg ha^{-1} ; FAO, 2010), ha generado la idea que los materiales invernales siempre obtienen un mayor rendimiento en grano respecto de los primaverales. Esto puede estar asociado a que presentan ciclos más largos (7-9 vs. 5-7 meses de siembra a cosecha en invernales y primaverales), y por lo tanto logran una mayor acumulación de materia seca pero sin cambios sustanciales en el índice de cosecha (Diepenbrock, 2000). Para que este mayor potencial de rendimiento se exprese, estos genotipos tienen mayores requerimientos de agua y nutrientes (70 vs. $50\text{-}60 \text{ kg N tn grano}^{-1}$ para invernales vs. primaverales; Pouzet, 1995), y necesitan explorar condiciones ambientales óptimas, especialmente temperaturas frescas en los períodos iniciales del cultivo para cubrir los requerimientos de vernalización. En el Capítulo 2 de esta tesis se mostró que, para las condiciones de Buenos Aires, los genotipos invernales no tuvieron rendimientos superiores al resto de los materiales en ninguno de los dos años evaluados (Figura 2.3). Los genotipos invernales sembrados tempranamente (*i.e.* 2008) prolongaron 20-30 días su etapa vegetativa por falta de temperaturas frescas para cubrir los requerimientos de vernalización (Figura 2.2 a), provocando que la etapa de postfloración coincidiera con temperaturas medias elevadas ($20,2\text{-}21,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$) que se asociaron con menores rendimientos (Figura 2.7 a y Tabla 2.6). Es esperable que esta misma respuesta ocurra en otras zonas de producción de colza-canola del país (*e.g.* norte de la provincia de Buenos Aires, y provincias con inviernos más cálidos como Santa Fe, Córdoba y Entre Ríos), donde el 25 % de los años puede haber sólo 20-50 horas de frío ($< 7 \text{ }^{\circ}\text{C}$) en el mes de julio, mientras que en Balcarce puede haber un mínimo de 90 horas en ese mismo mes, con la misma probabilidad (INTA, 2010). En estas zonas, elegir genotipos invernales por su mayor potencial de rendimiento puede significar un gran riesgo, especialmente si las siembras no se realizan tempranamente para tener mayor probabilidad de cubrir los requerimientos de vernalización (*i.e.* en los meses de marzo-abril). Por lo tanto, la información presentada en el Capítulo 2 de esta tesis resulta especialmente relevante para analizar las consecuencias de una incorrecta utilización de los genotipos invernales disponibles actualmente en el país, ya que en este grupo de genotipos se obtuvieron en promedio 540 y 780 kg ha^{-1} menos, en 2007 y 2008 (Figura 2.3), comparado con el resto de los primaverales (PC y PM).

A pesar de no contar con requisitos de vernalización, la elección de genotipos primaverales para maximizar el rendimiento no parece sencilla, especialmente la elección entre materiales cortos y medios. En el Capítulo 2 de esta tesis se mostró que en el año 2007 tuvieron un mejor rendimiento los PC (2017 vs. 1655 kg ha^{-1} para PC vs. PM, respectivamente) mientras que en el 2008 los PM fueron los que maximizaron el rendimiento (2976 vs. 3437 kg ha^{-1} para PC vs. PM). Sin embargo, los rangos de valores máximos y mínimos en cada grupo presentaron un grado importante de superposición (Figura 2.3), lo que indica escasas diferencias entre uno y otro grupo. Además, dentro de cada grupo, no se mantuvieron las posiciones relativas de los distintos genotipos (Tabla 2.3), lo que dificulta la decisión de elección no sólo entre grupos sino también entre genotipos dentro de cada grupo, al no encontrarse genotipos consistentemente

destacados del resto. Los datos generados por la Red de Colza del INTA no analizan comportamientos diferenciales de genotipos dentro de los grupos de PC y PM, pero coinciden en señalar una alta variabilidad ($CV > 30\%$) entre genotipos dentro de zonas y años (Iriarte *et al.*, 2008; 2007; 2006). La alta variabilidad en los rendimientos entre genotipos hallada en esta tesis (CV de 21 y 25 % para 2007 y 2008), en especial en el grupo de PM en siembras tempranas (2008), en parcelas conducidas sin limitaciones hídricas, bióticas ni nutricionales, y su difícil asociación con factores que controlan el rendimiento en otros cultivos de grano, hace difícil predecir cuáles son los rendimientos potencialmente obtenibles en una situación productiva dada. Esta incertidumbre puede ser minimizada en parte a través de un mayor conocimiento de la fenología de los materiales comerciales disponibles, para lo cual resulta útil el uso de modelos sencillos de predicción de fenología como el Cronocanola © (Miralles *et al.*, 2009). Sumado a esto, otra estrategia de manejo que maximice la oferta de recursos para el cultivo, como la fertilización, resulta una alternativa a considerar para maximizar el rendimiento y minimizar la incertidumbre del resultado del cultivo.

Fertilización con N y S para maximizar el rendimiento

La fertilización con N y S es la otra estrategia de manejo analizada para maximizar el rendimiento de colza-canola en Argentina. Si bien existen trabajos sobre fertilización en colza-canola en el país (Gambaudo y Fontanetto, 2008; Rubio *et al.*, 2007; Tamagno *et al.*, 1999), en general cuantifican la respuesta a la fertilización sin profundizar en el estudio de los mecanismos por los cuales los nutrientes afectan la generación del rendimiento. En el Capítulo 3 se describió el efecto de la aplicación de N y S ($47\text{--}279\text{ kg N ha}^{-1}$ y $9,1\text{--}69,4\text{ kg S ha}^{-1}$) en soluciones nutritivas durante todo el ciclo del cultivo y fertilización sólida (S en 2007 y 2008), sobre el rendimiento de dos genotipos sin déficit hídrico, profundizando el estudio del impacto sobre la biomasa y sus componentes fisiológicos, y sobre el rendimiento y sus componentes numéricos. Contrariamente a lo esperado, la respuesta del rendimiento al agregado de N no fue asintótica, sino lineal en todo el rango de N disponible explorado en los tres años (hasta 279 kg N ha^{-1} , Figura 3.11 a). Cuando dicha respuesta fue relativizada al rendimiento máximo de cada año (N_1) para poder compararla con otros trabajos de la literatura (Figura 5.1), los resultados mostraron una respuesta polinómica de 2° grado.

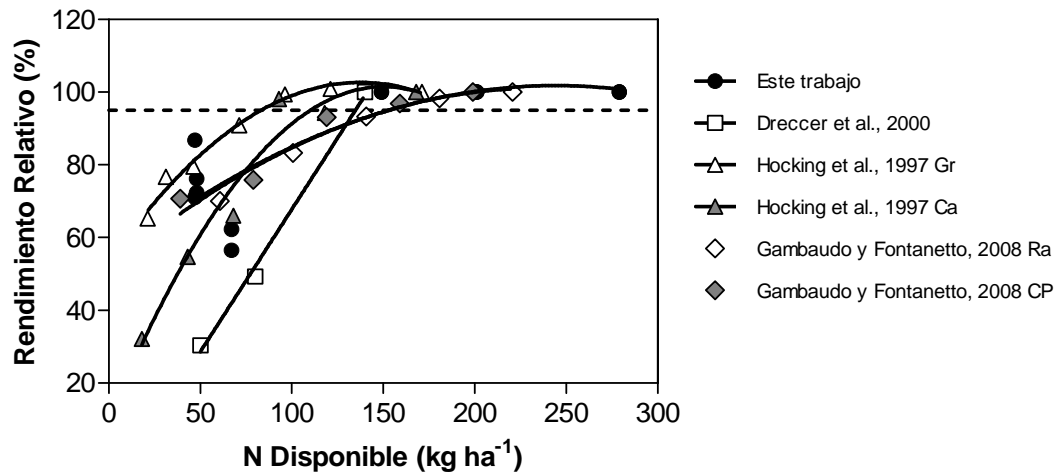


Fig. 5.1. Rendimiento en grano en colza-canola relativo (al máximo rendimiento observado con fertilización nitrogenada) en función del nitrógeno disponible (kg ha^{-1}). La línea punteada señala el rendimiento relativo de 95 % considerado para saturación de la respuesta del rendimiento al N disponible. Rendimientos máximos: 3350 kg ha^{-1} (Dreccer et al., 2000), 3520 y 2650 kg ha^{-1} en GR-Greenethorpe y CA-Canowindra, respectivamente (Hocking et al., 1997) y 3000 y 2900 kg ha^{-1} en RA-Rafaela y CP-C.Pellegrini, respectivamente (Gambaudo y Fontanetto, 2008). Las dos localidades de este último trabajo se ajustaron a una única ecuación. Ecuaciones descriptas en el Anexo 5.

La respuesta hallada en este trabajo, sin deficiencias hídricas, es casi idéntica a la observada por Gambaudo y Fontanetto (2008), quienes en condiciones a campo en dos localidades de Argentina (Rafaela: RA y C. Pellegrini: CP) y con fertilización sólida a la siembra, hallaron límites de respuesta que saturan el rendimiento (95 % de rendimiento relativo, Figura 5.1) con *ca.* de $150 \text{ kg N disponible ha}^{-1}$. En ensayos a campo en secano en dos localidades de Australia (Greenethorpe: GR y Canowindra: CA) y con fertilización a la siembra, Hocking *et al.* (1997) también hallaron respuestas polinómicas de segundo grado pero con un límite de respuesta menor (*ca.* $80\text{-}100 \text{ kg N ha}^{-1}$) y una mayor caída del rendimiento relativo en CA, explicado por una menor disponibilidad de agua en el período crítico de generación del rendimiento. Por último, los datos de Dreccer *et al.* (2000) trabajando en macetas sin limitación hídrica, ajustaron a una respuesta lineal, con rendimientos máximos con *ca.* de 130 kg N ha^{-1} (sin explorar rangos supra-óptimos) y una pendiente de respuesta al N alta y similar a los puntos iniciales de Hocking *et al.* (1997) en CA. Si bien las condiciones experimentales en cada uno de estos trabajos no son completamente comparables, permiten observar una amplia variabilidad de respuestas del rendimiento en grano al agregado de N en genotipos primaverales de colza-canola, aunque coinciden bastante en el nivel de N de saturación de su respuesta (*ca.* 120 kg N ha^{-1}). Las diferencias en las respuestas halladas (especialmente las pendientes de respuesta) podrían estar asociadas a otras limitantes diferentes al N o que interactúen con él, en especial la disponibilidad de agua, o a las condiciones ambientales durante el período de postfloración (*e.g.* temperatura y radiación), las cuales pueden ser distintas en los casos citados, aún tratándose en todos los trabajos de genotipos primaverales. Las comparaciones de rendimiento relativo al agregado de N pueden generar desplazamientos de los umbrales de N, sin embargo en este caso, los umbrales fueron muy similares a los obtenidos en esos mismos ensayos en términos absolutos.

Al igual que en otros cultivos, el número de granos (NG) es el componente que más responde al agregado de N y que mejor explica los cambios en el rendimiento en

colza-canola (Peltonen-Saino y Jauhiainen, 2008; Gómez, 2007; Scarisbrick *et al.*, 1981). Varios trabajos previos muestran aumentos del NG por agregado de nitrógeno (Cheema *et al.*, 2001; Hocking *et al.*, 1997; Asare y Scarisbrick, 1995), aunque la estabilidad del peso del grano (PG) se ponía en duda en algunos trabajos. En el Capítulo 3 de esta tesis, considerando las silicuas de toda la planta, se hallaron incrementos del NG del 24-77 % con una fuerte asociación entre el rendimiento y el NG (Figura 3.6), explicando este último el 98 % de la variación del rendimiento, observándose estabilidad en el PG e índice de cosecha (Tabla 3.8) para el amplio rango de N disponible explorado (*i.e.* 47 a 279 kg N ha⁻¹). Cuando se analizó un estrato en particular de silicuas del tallo principal en el Capítulo 4, también se observó estabilidad en el PG y en la dinámica de crecimiento del grano ante el agregado de N (Figura 4.6 y Tabla 4.3). Es decir que, considerando fuentes de variabilidad como la posición dentro de la planta, el PG fue consistentemente estable ante variaciones en la oferta de nitrógeno, acorde con lo hallado por Hocking y Mason (1993) y Ogunlela *et al.* (1990). Sin embargo, se contradice con los aumentos del PG hallados por Cheema *et al.* (2001) y Asare y Scarisbrick (1995), y con la caída encontrada por Hocking *et al.* (1997), aunque en este último caso, se refuerza la idea de que esa respuesta se debió a la falta de agua en el llenado, algo que se evitó en la presente tesis con la aplicación de fertilización líquida. La estabilidad encontrada en el PG en esta tesis aporta evidencias a favor de la utilidad de aumentar el número de granos para maximizar el rendimiento, sin altos riesgos de obtener efectos compensatorios entre componentes.

Aunque a nivel productivo a campo se menciona con frecuencia, el efecto del azufre sobre el rendimiento en colza-canola, en la literatura científica no es demasiado claro, existiendo pocas evidencias de aumentos del rendimiento (Malhi *et al.*, 2007; Rubio *et al.*, 2007; Blake-Kalff *et al.*, 2000), y menos aún de interacción significativa NxS (Jackson, 2000). Los resultados del Capítulo 3 de esta tesis muestran claramente una ausencia de respuesta al agregado de S, posiblemente debido a la que la disponibilidad de este nutriente en los tratamientos controles no fue limitante. Así, no se registraron cambios en la producción de biomasa (Figura 3.1), rendimiento en grano (Figura 3.4) e índice de cosecha (Tabla 3.8) y ausencia de interacción NxS en dos genotipos primaverales de colza-canola. Aún cambiando la fuente de S aplicada cada año (sulfato de potasio, sulfato de calcio y sulfato de amonio en 2006, 2007 y 2008, respectivamente) y logrando grandes desbalances en la relación N:S (de 0,7 a 19,1), no se halló ningún tipo de respuesta al agregado de S en el rango de disponibilidades de S logrado (9,1-69,4 kg ha⁻¹ S). En otros cultivos, como trigo, Salvagiotti *et al.* (2009), hallaron una respuesta en el rendimiento al agregado de S e interacción significativa NxS al agregar estos nutrientes en forma conjunta en ensayos a campo en Argentina. En este trabajo observaron cambios en la EAUN por el agregado de S, pasando de 10,7 en S₀ (0 kg S ha⁻¹ aplicados) a 15,8 en S₁ (30 kg S ha⁻¹ aplicados). A diferencia de lo observado en trigo por Salvagiotti *et al.* (2009), en la presente tesis no se observó efecto del S sobre la EAUN, ajustándose todos los tratamientos a una única regresión. Además de la elevada oferta de S en los tratamientos S₀, puede haber otras causas que expliquen la falta de respuesta a este nutriente, y que también han sido planteadas para otro cultivos: (i) la falta de confiabilidad en las determinaciones de S en suelo en Argentina (Cordone y Martínez, 2003), y (ii) la interacción con otros factores, como el contenido de MO o el nivel de pH que podrían generar inmovilización de este nutriente. Será necesario por un lado, lograr una mayor confiabilidad en las determinaciones S en suelo, lo que podría hacerse incluyendo su cuantificación en tejidos, aunque con un mayor costo y menos posibilidades de anticiparse a las deficiencias de este nutriente, y por el otro, incluir estimaciones de aportes de S por mineralización de la MO para tener

una mejor aproximación del S disponible durante el ciclo del cultivo y contrastarlo con los requerimientos del cultivo para definir la necesidad de fertilización azufrada.

En función a los datos obtenidos en la presente tesis en los Capítulos 2 y 3, se acepta parcialmente la Hipótesis 2, que plantea que **“el rendimiento en grano es afectado por el agregado de N y S, en situaciones de deficiencia de estos nutrientes, a través de cambios en la biomasa generada sin cambios significativos en el IC. Desde el punto de vista de los componentes numéricos, el componente de mayor respuesta al agregado de nutrientes será el número de granos por unidad de superficie, no afectándose el peso de los mismos”**, dicha hipótesis se acepta para el agregado de N, pero se rechaza para el caso del S donde no se observó efecto para ninguna de las variables analizadas ni interacción entre nutrientes. Por otro lado, se rechaza y la Hipótesis 3, que afirma que **“la respuesta del rendimiento al N es mayor cuando la aplicación se acompaña con S debido a una interacción positiva entre ambos nutrientes”**. Ambas hipótesis

5.1.2. Estrategias para maximizar la calidad del grano

Si bien el aumento del rendimiento en grano es el principal componente del resultado económico de los cultivos de grano, en colza-canola también cobran importancia algunos parámetros de calidad que están incluidos dentro de las normas de comercialización, como ya fue descripto en los Capítulos 2 y 4, y que impactan en el precio del grano a través de bonificaciones o descuentos. Por este motivo, resulta importante el análisis de las estrategias tendientes a maximizar la calidad del grano, con el objetivo de mejorar los márgenes económicos del cultivo y obtener un grano acorde a la calidad requerida en el mercado mundial por los principales países potencialmente compradores. Para ello se analizarán la elección de genotipos y la fertilización con N y S como estrategias para maximizar la calidad del grano.

Elección de genotipos para maximizar la calidad

La calidad del grano está definida por factores genotípicos y ambientales. Trabajos previos en otros países productores han mostrado una mayor estabilidad de la calidad comparada con la variabilidad del rendimiento (Si y Walton, 2004) y una fuerte influencia de las condiciones ambientales durante el llenado de los granos, especialmente las temperaturas y precipitaciones, sobre la calidad (Werteker *et al.*, 2010; Si y Walton, 2004; Pritchard *et al.*, 2000; Walton *et al.*, 1999). Sin embargo, para las condiciones de Argentina y para los genotipos introducidos localmente, no existía información sobre la calidad de grano lograda al evaluarlos en simultáneo en un mismo ambiente. En el Capítulo 2 de esta tesis se mostró que bajo las condiciones ambientales de Buenos Aires y con los genotipos disponibles en el país, es posible obtener granos de colza-canola de muy buena calidad para su uso alimentario: *i.e.* (i) alto contenido de aceite, (ii) bajo contenido de ácidos grasos saturados y alto de monoinsaturados y (iii) niveles inferiores a los máximos tolerados de ácido erúico (< 2 %) y glucosinolatos (< 20 $\mu\text{moles g}^{-1}$) (Tabla 2.4 y Tabla 2.5).

La variabilidad hallada en la calidad del grano (contenido de aceite y perfil de ácidos grasos) entre genotipos fue menor (CV entre 3 a 13 % dependiendo de la variable analizada) que la variabilidad en rendimiento (CV de 37 %), y en ambos casos estuvo mayormente asociada a cambios en las condiciones ambientales durante la etapa de postfloración y en especial a la temperatura media (Figura 2.8) ya que las distintas variables de calidad tuvieron menor relación con la radiación incidente (Tabla 2.6) que covarió con la temperatura (Figura 2.7 b). Los genotipos evaluados difirieron

marcadamente en el momento de ocurrencia del inicio de floración entre grupos de materiales comerciales y en el ambiente explorado durante el llenado en cada año (Tabla 2.3), de manera que los genotipos PC tuvieron llenados más frescos y los INV los llenados más cálidos en ambos años (16,9-17,1-18,2 °C y 13,8-15,6-21,0 °C para PC-PM-INV en 2007 y 2008; Figura 2.6). De esta manera, al igual que con la maximización del rendimiento, la elección de genotipos para maximizar la calidad debe tener en cuenta el momento de ocurrencia de la floración para superponer la etapa de postfloración con las mejores condiciones ambientales (< temperatura). Este momento de ocurrencia estará definido por el hábito de crecimiento del genotipo (INV, PC, PM) y las condiciones ambientales (especialmente temperatura) exploradas en cada año en particular, las cuales pueden ser muy variables en la región pampeana (INTA, 2010).

Si bien existen evidencias en otros países de que el contenido de aceite es afectado por las temperaturas medias durante el llenado en condiciones a campo (Si y Walton, 2004; Walton *et al.*, 1999), no había estudios para genotipos y ambientes locales. Los resultados del Capítulo 2 mostraron una relación bi-lineal entre estas variables (Figura 2.8 a), acorde al modelo propuesto por Robertson y Holland (2004). Sin embargo, incluyendo los resultados de los Capítulos 2 y 4 (n= 50), los resultados se ajustan tanto a una relación lineal como bi-lineal ($R^2 = 0,40$ en ambos modelos), con una reducción de 0,71 puntos porcentuales de aceite por cada grado de aumento de la temperatura media durante la etapa de postfloración para un amplio rango de temperaturas (13-22 °C) (Figura 5.2). Esta respuesta es comparable a la hallada por Si y Walton (2004) y Walton *et al.* (1999) en cuanto a la tasa de reducción, aunque los contenidos de aceite logrados en estas localidades australianas fueron inferiores y nunca superaron el 44 %, seguramente debido a las sequías terminales a las que suelen estar expuestos los cultivos invernales en esta zona. En el trabajo de Robertson y Holland (2004), evaluaron un genotipo primaveral en varias localidades australianas, fechas de siembra y años (n= 51), obteniendo una caída del contenido de aceite con mayor pendiente que la observada en la presente tesis, posiblemente asociado a déficit hídricos y temperaturas mayores a 22 °C (línea c en Figura 5.2). Conocer los cambios en el contenido de aceite ante cambios en la temperatura es importante porque permite cuantificar la reducción de este atributo de calidad y conocer el riesgo que se corre al elegir genotipos de mayor duración del ciclo y/o al atrasar la fecha de siembra, de manera de evitar que el llenado de granos se produzca bajo condiciones térmicas más desfavorables.

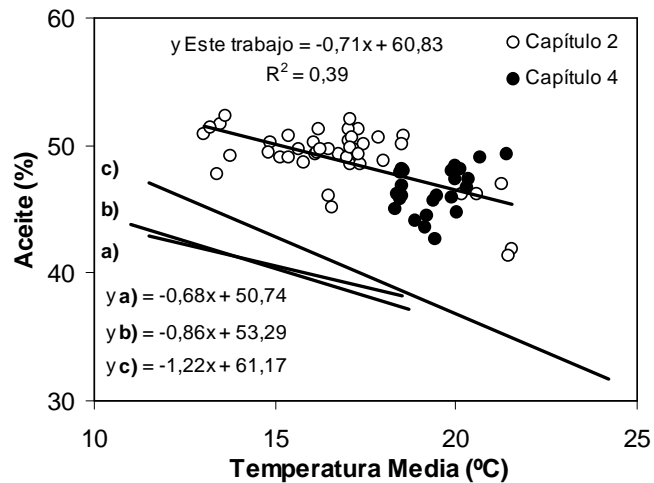


Fig. 5.2. Contenido de aceite en grano (% en base seca) en función de la temperatura media promedio durante la etapa postfloración (IFI-MF) en colza-canola. Se incluyen los datos de este trabajo (Capítulo 2 en círculos blancos, 20-24 genotipos evaluados en dos años, y Capítulo 4 en círculos negros, 2 genotipos primaverales evaluados en tres años) y regresiones lineales realizadas a partir de los datos observados en Australia por Si y Walton, 2004 (a), Walton *et al.*, 1999 (b) y Robertson y Holland, 2004 (c).

El perfil ácidos grasos varía principalmente por efecto de la temperatura en la etapa de postfloración (Baux *et al.*, 2008; Pritchard *et al.*, 2000; Triboui-Blondel y Renard, 1999; Trémolières *et al.*, 1982; Canvin, 1965). El análisis de las condiciones ambientales durante la etapa de postfloración, incluyendo los datos del Capítulo 2 y 4 de esta tesis, mostró una fuerte influencia de la temperatura sobre el contenido de linoleico (Figuras 2.8 c y 4.9 a), mientras que a diferencia de lo que ocurre en otros cultivo, el ácido oleico (*ca.* 64 %) no fue sustancialmente afectado por la temperatura. En girasol, Izquierdo *et al.* (2009) e Izquierdo *et al.* (2002) hallaron aumentos del contenido de oleico de 30 y 20 puntos porcentuales para un rango de temperaturas mínimas nocturnas de 10-26 °C, dependiendo de la sensibilidad genotípica, en el sudeste de la provincia de Buenos Aires. Expresando los datos de oleico del Capítulo 2 en función de la temperatura mínima, éste aumentó sólo 5 puntos porcentuales (62 a 67 %) al pasar de 8,5 a 16,5 °C de temperatura mínima durante la etapa de postfloración, siendo mucho menor al cambio observado en girasol. Es posible concluir que tanto la elección de genotipos de colza-canola como las condiciones ambientales (temperatura y radiación) durante la etapa postfloración no alteran sustancialmente la calidad del aceite medida a través del ácido graso más abundante (oleico). Esto es diferente a lo que ocurre en girasol y lino, donde el ácido oleico mostró una gran sensibilidad a cambios en las condiciones ambientales, especialmente temperatura (Izquierdo *et al.*, 2009; Dybing y Zimmerman, 1965). Así, la calidad del grano de colza-canola fue afectada por las condiciones ambientales especialmente post-floración, siendo más importantes las variaciones en el % de aceite que en su composición, sin efectos sobre el contenido de ácido erúcido y glucosinolatos.

De este modo, se acepta la Hipótesis 1, la cual plantea que **“la calidad comercial de grano (*i.e.* contenido de aceite, perfil de ácidos grasos y contenido de glucosinolatos) es variable entre los genotipos comerciales de colza-canola, asociada principalmente a las diferentes condiciones ambientales exploradas durante el llenado de los granos, fundamentalmente temperatura y radiación”**. Sin embargo, como fue mencionado anteriormente, los dos factores ambientales evaluados (temperatura y radiación) no tuvieron igual peso en la definición de la calidad, ya que la

temperatura fue el factor que más asociación presentó con la mayoría de las variables de calidad del grano de colza-canola evaluadas y la radiación resultó una covariable de la temperatura.

Fertilización con N y S para maximizar la calidad

La fertilización nitrogenada en colza-canola ha sido ampliamente estudiada, observándose un efecto negativo sobre el porcentaje de aceite del grano (Rathke *et al.*, 2005; Hocking *et al.*, 1997; Asare y Scarisbrick, 1995; Holmes y Ainsley, 1977). El efecto del S sobre el contenido de aceite del grano es más incierto, debido a la contradicción existente en algunas evidencias (Malhi *et al.*, 2007; Asare y Scarisbrick, 1995). En el Capítulo 4 se halló un efecto inverso en el contenido de aceite y proteína al aumentar la disponibilidad de N (Figura 4.1). Sin embargo, el efecto sobre el rendimiento en aceite ($\text{kg de aceite ha}^{-1}$) fue positivo (Figura 4.2), debido a que el aumento en rendimiento fue más que proporcional a la caída en el porcentaje de aceite. Para el caso del S, la elevada disponibilidad en los tratamientos controles no permitió hallar efecto de este nutriente sobre ningún parámetro de calidad (Tablas 4.1 y 4.2) ni interacción N x S, a pesar del gran desbalance logrado entre ambos. Si bien la estrategia de fertilización nitrogenada generó una reducción de la calidad evaluada a través del contenido de aceite, esta caída es menos que proporcional que el aumento del rendimiento y siempre estuvo por encima del valor indicado en la base de comercialización (43 %). De manera que, dentro del rango de disponibilidades de N evaluado en la presente tesis (hasta 279 kg N ha^{-1}) y para los genotipos disponibles actualmente en Argentina, no habría riesgo de sufrir descuentos en el precio debido a perjuicios en la calidad del grano.

El agregado de N en el cultivo de colza-canola determina un aumento del número de estructuras reproductivas (destinos), al igual que ocurre en otros cultivos (Arisnabarreta y Miralles, 2006; Cantagallo *et al.*, 1997; Fischer, 1993), siendo el número de silicuas por planta el subcomponente que explica dichos cambios (Cheema *et al.*, 2001; Hocking *et al.*, 1997). Este incremento del número de silicuas implica además un aumento en el área verde fotosintetizante durante el llenado de los granos, ya que las mismas silicuas pasan a ser fuente y destino, lo que implica una co-limitación entre fuente-destino en este cultivo (Iglesias, 2006). Los resultados del Capítulo 3 de esta tesis mostraron cambios en la relación fuente-destino en respuesta a la fertilización, a través de: (i) un importante aumento del número de estructuras reproductivas por agregado de N (24-77 %, Tabla 3.8), (ii) estabilidad en el PG, (iii) reducción en el contenido porcentual de aceite y (iv) aumento del porcentaje de proteínas del grano (Tabla 4.1). Al no variar el PG, el aumento del N disponible para el cultivo generó un incremento en la cantidad de N por grano más que proporcional al aumento del NG, explicando el aumento en el porcentaje de proteínas del grano. Además, se observó una disminución del % de aceite menos que proporcional al aumento de proteína en el grano ($-0,57$; Figura 4.1), indicando que el porcentaje de aceite no se redujo únicamente por un efecto indirecto de dilución al aumentar el contenido de N del grano, sino que también el metabolismo de C en el grano estaría afectado por la fertilización. La estimación grosera de la cantidad de asimilados disponibles por grano (estimada a partir del cociente entre biomasa aérea total a cosecha y el NG, Tablas 3.6 y 3.8) mostró valores de 5-7 mg de materia seca por grano, sin cambios significativos con el nivel de fertilización, pero se requieren estimaciones más sensibles de la disponibilidad de C en los granos, que discriminen entre los compuestos carbonados del grano (aceite y carbohidratos). Así, con la información obtenida en esta tesis (que comprendió muestreos destructivos sólo a cosecha debido al limitado número de plantas en cada

contenedor) no es posible concluir completamente si la caída del contenido de aceite se asocia con una menor cantidad de fotoasimilados disponibles para la síntesis de aceite del grano.

Existen algunas controversias sobre el posible efecto del nitrógeno en el perfil de ácidos grasos del aceite de colza-canola (Gao *et al.*, 2010; Behrens, 2002; Ibrahim *et al.*, 1989). Los resultados presentados en el Capítulo 4 de esta tesis muestran que los ácidos grasos mayoritarios que componen el aceite de colza-canola no se modificaron significativamente con la oferta nutricional del cultivo (Tabla 4.2), al igual que lo hallado por Ibrahim *et al.* (1989), resultando muy estable la composición final de ácidos grasos y también la dinámica de acumulación de los mismos durante el llenado de granos ante cambios en la oferta de N en ambos genotipos (Figura 4.8). Aunque existieron leves diferencias genotípicas en las relaciones entre ácidos grasos, como consecuencia una posible contaminación con ácido erúxico de la semilla sembrada (Figura 4.5 a y b). De esta manera, la estrategia de fertilización con nitrógeno para maximizar la calidad, no parece implicar riesgo alguno de afectar negativamente el perfil ácido del grano.

Así, se acepta parcialmente la Hipótesis 4 de esta tesis la cual plantea que: **“una mayor oferta de N reduce el porcentaje de aceite del grano, al aumentar la cantidad de estructuras reproductivas (destinos), lo cual disminuye la cantidad de fotoasimilados disponibles por grano para la síntesis de aceite”**. Sin embargo, como se discutió anteriormente, la segunda parte de la hipótesis requiere estudios más profundos sobre los metabolismos de carbono y nitrógeno para concluir al respecto.

El principal efecto estudiado de la disponibilidad de S sobre los atributos de calidad es el contenido de glucosinolatos (Malhi *et al.*, 2007) y se ha sugerido un contrabalance de la fertilización con N sobre el agregado de S (Fismes *et al.*, 2000). Si bien estos metabolitos secundarios están compuestos por una importante cantidad de S (Zaho *et al.*, 1997), los efectos de la fertilización azufrada sobre los mismos no son claros. Los datos presentados en el Capítulo 4 muestran una total ausencia de efecto tanto de N como de S sobre el contenido de glucosinolatos, que se ubicó en niveles por debajo del límite de aceptación comercial de colza-canola ($3,93 \pm 0,19 \mu\text{moles g}^{-1}$ en promedio de todos los tratamientos y años; Tabla 4.1). En el Capítulo 2, cuando se fertilizó a todos los genotipos evaluados con altos niveles de N y S para maximizar el rendimiento, los glucosinolatos también se mostraron relativamente estables y dentro de los límites comerciales ($< 7 \mu\text{moles g}^{-1}$ en promedio), a excepción de *Eclipse* en 2007 (que como ya fue discutido en el Capítulo 2 se detectó contaminación en la semilla provista por el semillero) y los genotipos invernales en el año 2008 ($14,5 \mu\text{moles g}^{-1}$; Tabla 2.4). Este aumento de los glucosinolatos en materiales invernales en 2008 pareció estar relacionado con la ocurrencia de temperaturas supra-óptimas (temperatura máxima $>30^\circ\text{C}$) durante la etapa de postfloración, ya que mostró un patrón de respuesta bi-lineal a la temperatura media (Figura 2.8 b), similar al propuesto por Jensen *et al.* (1996), sin embargo en ningún caso se excedió el límite de $20 \mu\text{moles g}^{-1}$ de glucosinolatos. De manera que, en genotipos de *Brassica napus* mejorados para bajos contenidos de glucosinolatos en grano, resulta difícil exceder los contenidos aceptables dentro de las normas de comercialización ($<20 \mu\text{moles g}^{-1}$), siendo este un parámetro de calidad muy estable ante cambios en los genotipos y en planteos productivos de alta fertilización con N y S. Así, se rechaza la Hipótesis 5 propuesta en este trabajo la cual plantea que **“la disponibilidad de S aumenta el contenido de glucosinolatos en el grano, pero es contrabalanceada por un aumento en la cantidad de N disponible”**.

5.2. ASPECTOS NO RESUELTOS, INTERROGANTES PLANTEADOS E INVESTIGACIONES FUTURAS

Si bien los interrogantes planteados y los aspectos no resueltos de cada tema particular fueron discutidos en detalle en los capítulos 2, 3 y 4 de esta tesis, a continuación se señalan algunos de los aspectos de mayor importancia. En el Capítulo 2, el análisis de las condiciones ambientales durante el período crítico de generación del rendimiento y la utilidad del Q para explicar los cambios en el rendimiento entre genotipos generaron dudas sobre la utilización de un valor fijo de duración del período crítico (PCr) para todos los genotipos. Esto crea la necesidad de determinar la duración del período crítico, especialmente para los genotipos primaverales usados localmente, ya que la estimación de 350 °Cd de Habekotté (1997b) fue realizada para genotipos invernales. Este es un paso necesario para poder continuar en el estudio y la aplicación del cociente fototermal en este cultivo, herramienta útil para la toma de decisiones que maximice el rendimiento y fundamentalmente explique las enormes variaciones del rendimiento en grano observadas a campo entre zonas, años y fechas de siembra, siendo esta inestabilidad una de las principales limitantes para la difusión del cultivo en Argentina. Además, será necesario contar con investigaciones en condiciones más controladas que manipulen la radiación interceptada durante el PCr (sin covariar con la temperatura), como los realizados en girasol por Cantagallo *et al.* (1997), que permitirían afirmar definitivamente si el Q no es aplicable en colza-canola.

La comparación de la respuesta del rendimiento al agregado de N obtenida en el Capítulo 3 con los resultados de otros trabajos de la literatura, permitió estimar un valor de N disponible en el cual el rendimiento se saturó en un amplio rango de situaciones (*ca.* 120 kg N ha⁻¹). Sin embargo, se halló una gran variabilidad en la respuesta en los valores más bajos de N disponibles, surgiendo la necesidad de integrar la respuesta del N en esos niveles con otras variables que pueden estar interactuando, como por ejemplo la disponibilidad de agua y la potencialidad del ambiente explorado (especialmente temperatura y radiación postfloración).

La constante ausencia de efecto del S hallada en la presente tesis, tanto sobre variables de rendimiento como de calidad del grano de colza-canola, sumado a la diferencias en las respuestas observadas en la literatura, genera el interrogante sobre si es que realmente no existe respuesta al agregado de S o si no se han explorado ambientes lo suficientemente limitantes de este nutriente como para observar respuestas a la fertilización. En situaciones a campo los resultados sobre el rendimiento de fertilizaciones azufradas son muy erráticos para todos los cultivos, hallándose en general bajos ajustes en la respuesta del rendimiento al agregado de S. Un cuestionamiento que surge es si se está realizando un diagnóstico correcto de disponibilidad de este nutriente en el suelo, ya que existen algunas dudas sobre cuál es la forma correcta de S para determinar su disponibilidad. Actualmente en Argentina se mide el contenido de S-SO₄ en el suelo, pero en otros países se utiliza una combinación de los valores de S-SO₄ y del S orgánico fácilmente mineralizable (Cordone y Martínez, 2003). El aporte de S por mineralización puede ser importante en suelos bien provistos de materia orgánica, como son los suelos pampeanos. Por lo tanto surge la necesidad de lograr una mayor confiabilidad en la determinación del S como una posible vía para mejorar el diagnóstico de fertilización requerido y el ajuste del rendimiento al agregado de este nutriente. En el cultivo de colza-canola, esto resulta realmente importante debido a los mayores requerimientos de S en comparación con el resto de los cultivos (IPNI, 2010) y al costo del fertilizante azufrado. Promover fertilizaciones azufradas excesivas que no generen una respuesta positiva en el rendimiento podría afectar negativamente el

beneficio económico del cultivo y el medioambiente a través del uso ineficiente de recursos.

La comprensión de las causas de la caída del porcentaje de aceite por agregado de N es un aspecto no totalmente conceptualizado en la presente tesis. Pudo observarse un efecto directo del N sobre el porcentaje de proteínas del grano, debido al aumento de la cantidad de N disponible por grano y la constancia del peso individual de grano frente a los tratamientos de fertilización. Además, el reemplazo de aceite por proteína fue menos que proporcional, descartando un simple efecto de dilución de aceite por proteína en el grano. Para concluir al respecto serán necesarias cuantificaciones del metabolismo del carbono del cultivo en respuesta a la fertilización, ya sea directas (mediciones de fotosíntesis en tallos y silicuas, síntesis de lípidos en granos) o indirectas (mediciones de senescencia, contribución de asimilados prefloración y removilización de tallos), para comprender los mecanismos asociados a la reducción del contenido de aceite del grano en respuesta al agregado de N, en interacción con la respuesta del metabolismo de C (Triboi y Triboi-Blondel, 2002). Una complicación adicional a considerar en este cultivo es el reemplazo de los órganos fotosintetizantes hacia mediados del ciclo, cuando los tallos y silicuas pasan a ser las principales fuentes de carbono de la planta, tanto en el aporte de fotosíntesis actual como la removilización de asimilados desde tallos y silicuas, aspectos que requieren mayor estudio en colza-canola.

5.3. CONCLUSIONES GENERALES

El trabajo realizado en esta tesis, que comprendió tres años de experimentación en condiciones semicontroladas y dos a campo, permitió abordar la totalidad de los objetivos propuestos, que incluyeron (i) el estudio de la variabilidad en el rendimiento y la calidad del grano en un amplio rango de genotipos comerciales y (ii) el análisis de los cambios generados por la fertilización nitrogenada y azufrada sobre los componentes del rendimiento y (iii) la calidad del grano en colza-canola, permitiendo concluir que:

(i) los genotipos comerciales de Argentina evaluados en el Capítulo 2 de la presente tesis presentan una importante variabilidad en el rendimiento en grano entre genotipos ($CV= 25$ y 21% en 2007 y 2008, respectivamente) y entre años ($CV= 37\%$ en 2 años). Los parámetros de calidad del grano resultan más estables entre genotipos y años, pero están fuertemente comprometidos cuando las condiciones ambientales durante el llenado resultan adversas (*i.e.* altas temperaturas postfloración en genotipos invernales). Tanto el rendimiento como la calidad del grano se reducen cuando la etapa postfloración explora temperaturas medias $>13\text{ }^{\circ}\text{C}$, siendo éste el factor ambiental de mayor influencia,

(ii) la respuesta lineal y positiva del rendimiento en grano a la fertilización nitrogenada mostrada en el Capítulo 3 pudo integrarse a los resultados de otros trabajos de la literatura y permitió estimar un valor de N disponible (*ca.* 120 kg N ha^{-1}) en el cual el rendimiento se satura en un amplio rango de ambientes. El aumento del rendimiento se explica por incrementos de la biomasa aérea total y del número de granos por unidad de área. La fertilización nitrogenada y azufrada no afecta la partición a raíz y a grano, así como tampoco la eficiencia de uso de la radiación y el peso del grano. Las eficiencias de uso del N (EAUN, EAN y EFUN) son constantes en ambos genotipos primaverales evaluados, y no se alteraron por la oferta de S (hasta $69,4\text{ kg S ha}^{-1}$). No se registró interacción $\text{N} \times \text{S}$, debido a la falta de limitación de S en los tres años de ensayos, aún aplicando distintas fuentes de S y un amplio rango de N:S (1 a 20),

(iii) la calidad del grano de colza-canola varía en menor magnitud por el agregado de N que el rendimiento y sus componentes (Capítulo 4). Los contenidos porcentuales de aceite y proteína del grano fueron los atributos de calidad más sensibles, respondiendo de manera inversa entre ellos, indicando una mayor utilización del N para la síntesis proteica, causando un detrimento más que proporcional de la concentración de aceite. El perfil de ácidos grasos resulta muy estable ante cambios en la fertilización del cultivo durante todo el ciclo, siendo esta estabilidad una característica positiva de los genotipos de colza-canola actualmente cultivados en el país (Capítulos 2 y 4). El agregado de S tampoco modifica ningún parámetro de calidad del grano.

Así, con los genotipos modernos de colza-canola disponibles actualmente en Argentina es posible obtener altos rendimientos a través de la correcta ubicación del período postfloración en condiciones ambientales de temperaturas frescas, sumado a planteos de alta fertilización nitrogenada que maximizan el rendimiento en aceite sin riesgo de afectar la calidad del grano.

REFERENCIAS

- Abdallah, M.; L. Dubousset, F. Meuriot, P. Etienne, J-C. Avise and A. Ourry. 2010. Effect of mineral sulphur availability on nitrogen and sulphur uptake and remobilization during the vegetative growth of *Brassica napus* L. *Journal of Experimental Botany* Vol. 61, No. 10: 2635-2646.
- Aksouh, N. M.; B.C. Jacobs; F.L. Stoddard and R.J. Mailer. 2001. Response of canola to different heat stresses. *Australian Journal of Agricultural Research* 52: 817-824.
- Aksouh-Harradj, N. M.; L.C. Campbell and R.J. Mailer. 2006. Canola response to high and moderately high temperature stresses during seed maturation. *Canadian Journal of Plant Science* 86: 967-980.
- Allen, E.J. and D.J. Morgan. 1972. A quantitative analysis of the effects of nitrogen on the growth, development and yield of oilseed rape. *Journal Agricultural Science, Cambridge* 78: 315-324.
- Álvarez, R. 1999. Uso de modelos de balance para determinar los requerimientos de fertilizante nitrogenado de trigo y maíz. *EUDEBA*. 58p.
- Álvarez, R. y H.S. Steinbach. 2006. Valor agronómico de la materia orgánica. pp. 13-29. En: *Materia Orgánica. Valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos*. Álvarez (Ed.). *Editorial Facultad de Agronomía*, Buenos Aires.
- Andersen, M.; T. Heidman and F. Plauborg. 1996. The effects of drought and N on light interception, growth and yield of winter oilseed rape. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil Plant Science* 46: 55-67.
- Angadi, S.V.; H. W. Cutforth, B. G. McConkey, and Y. Gan. 2003. Yield Adjustment by Canola Grown at Different Plant Populations under Semiarid Conditions. *Crop Science* 43: 1358-1366.
- Apella, C. 2010. Periodo crítico del cultivo de colza y rendimiento potencial de genotipos primaverales e invernales. Tesis para optar por el grado de Magíster. Facultad de Ciencias Agrarias – Universidad de Mar del Plata-INTA Balcarce (en escritura).
- Arisnabarreta, S. and D.J. Miralles. 2008. Critical period for grain number establishment of near isogenic lines of two- and six-rowed barley. *Field Crops Research* 107: 196-202.
- Arnoud, F. 1989. Colza: selection, variétés. *Cahier Technique*. CETIOM. París, Francia. 28p.
- Asare, E. and D.H. Scarisbrick. 1995. Rate of nitrogen and sulphur fertilizers on yield, yield components and seed quality of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Field Crops Research* 44: 41-46.
- Austin, R.B.; J. Bingham; R.D. Blackwell; L.T. Evans; M.A. Ford; C.L. Morgan and M. Taylor. 1980. Genetic improvements in winter wheat yields since 1900 and associated physiological changes. *Journal Agricultural Science, Cambridge* 94: 675-689.
- Ayerza, A. 2009. Dinámica del llenado de granos en cultivares comerciales de canola (*Brassica napus* L.). Trabajo de intensificación para optar por el grado de Ingeniero Agrónomo. FAUBA. 33p.

- Barracloougha, P.B.; J.R. Howartha, J. Jonesa; R. Lopez-Bellidob, S. Parmara, C.E. Shepherd and M.J. Hawkesforda. 2010. Nitrogen efficiency of wheat: Genotypic and environmental variation and prospects for improvement. *European Journal of Agronomy* 33: 1-11.
- Baux, A.; T. Hebeisen and D. Pellet. 2008. Effects of minimal temperatures on low-linolenic rapeseed oil fatty-acid composition. *European Journal of Agronomy* 29: 102-107.
- Behrens, T. 2002. Stickstoffeffizienz von Winterraps (*Brassica napus* L.) in Abhängigkeit von der Sorte sowie einer in Menge. In: Zeit und Form variierten Stickstoffdüngung, Cuvillier Verlag, Göttingen.
- Blake-Kalff, M.M.A.; M.J. Hawkesford; F.J. Zhao and S.P. McGrath. 2000. Diagnosing sulfur deficiency in field-grown oilseed rape (*Brassica napus* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant and Soil* 225: 95-107.
- Bragachini, M.; R. Carrizo y L. Bonetto. 1991. Cosecha de colza. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria - PROPECO. Cuaderno de Actualización Técnica 8. 36p.
- Brennan, R.F. and M.D.A. Bolland. 2007. Effect of fertiliser phosphorus and nitrogen on the concentrations of oil and protein in grain and the grain yield of canola (*Brassica napus* L.) grown in south-western Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 47: 984-991.
- Canola Council. 2010. Canola Oil for Healthy Cooking. [en línea] [consulta: julio de 2010] <http://www.canolacouncil.org/canola_oil_for_healthy_cooking.aspx>
- Cantagallo, J.E.; C.A. Chimenti y A.J. Hall. 1997. Number of seed per unit area in sunflower correlates well with a photothermal quotient. *Crop Science* 37: 1780-1786.
- Canvin, D.T. 1965. The effect of temperature on the oil content and fatty acid composition of the oils from several oil seed crops. *Canadian Journal of Botany* 43: 62-69.
- Cassman, K.G.; S.K. De Datta; D.C. Olk; J. Alcantara; M. Samson; J.P. Descalsota and M. Dizon. 1995. Yield decline and the nitrogen economy of long-term experiments on continuous, irrigated rice systems in the tropics. pp 181-222. In: R. Lal and B.A. Stewart (ed.) *Soil Management: Experimental Basis for Sustainability and Environmental Quality*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Cheema, M.A.; M.A. Malik; A. Hussain; S.H. Shah and S.M.A. Basra. 2001. Effects of Time and Rate of Nitrogen and Phosphorus Application on the Growth and the Seed and Oil Yields of Canola (*Brassica napus* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science* 186: 103-110
- Colbach, N.; C. Clermont-Dauphin and J.M. Meynard. 2001a. GeneSys: a model of the influence of cropping system on gene escape from herbicide tolerant rapeseed crops to rape volunteers. I. Temporal evolution of a population of rapeseed volunteers in a field. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 83: 235-253.
- Colbach, N.; C. Clermont-Dauphin and J.M. Meynard. 2001b. GeneSys: a model of the influence of cropping system on gene escape from herbicide tolerant rapeseed crops to rape volunteers. II. Genetic exchanges among volunteer and cropped populations in a small region. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 83: 255-270.
- Conover, W.J. 1999. Practical Nonparametric Statistics (3rd edition). Ed. Wiley. 592p.
- Cordone, G. y F. Martinez. 2003. El azufre en el sistema productivo agrícola del Centro-Sur de Santa Fe. [en línea] [consulta: julio de 2010] <www.ipni.net/ppiweb>

- De Wit, C.T. 1953. A physical theory on placement of fertilizers. Vers. Landbouwk. Onderz. (Agric. Res. Rep.) 59.4. Staatsdrukkerij-Gravenhage.
- Delogu, G.; L. Cattivelli; N. Pecchioni; D. De Falcis; T. Maggiore and A. M. Stanca. 1998. Uptake and agronomic efficiency of nitrogen in winter barley and winter wheat. *European Journal of Agronomy* 9: 11-20.
- Diepenbrock, W. 2000. Yield analysis of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): a review. *Fields Crops Research* 67: 35-49.
- Diepenbrock, W. and F. Grosse. 1995. Rapeseed (*Brassica napus* L.) physiology. En: Physiological potentials for yield improvement of annual oil and protein crops. Eds. Diepenbrock, W., Becker, H.C. Adv. *Plant Breeding* 17, 21-53.
- Diepenbrock, W. and G. Geisler. 1979. Compositional changes in developing pods and seed of oilseed rape (*Brassica napus* L.) as affected by pod position on the plant. *Canadian Journal of Plant Science* 59: 819-830.
- Doyle, A.D. and I.C.R. Holford. 1993. The uptake of nitrogen by wheat, its agronomic efficiency and their relationship to soil and fertilizer nitrogen. *Australian Journal of Agricultural Research* 44, 1245-1258.
- Dreccer, M.F.; A.H.M. Schapendonk; G.A. Slafer and R. Rabbinge. 2000. Comparative response of wheat and oilseed rape to nitrogen supply: absorption and utilization efficiency of radiation and nitrogen during the reproductive stage determining yield. *Plant and Soil* 220: 189-205.
- Dubousset, L.; P. Etienne and J. C. Avicé. 2010. Is the remobilization of S and N reserves for seed filling of winter oilseed rape modulated by sulphate restrictions occurring at different growth stages?. *Journal of Experimental Botany* Vol. 61, No. 15: 4313-4324.
- Dybing, C.D. and D.C. Zimmerman. 1965. Temperature effects on flax (*Linum usitatissimum* L.) growth, seed production and oil quality in controlled environments. *Crop Science* 5: 184-187.
- Egli, D.B. 1998. Seed growth and development. In: Seed biology and the yield of grain crops. *CAB International*. pp. 15-37.
- Elias, S.G. and L.O. Copeland. 2001. Physiological and harvest maturity of canola in relation to seed quality. *Agronomy Journal* 93:1054-1058.
- FAO. 2010. Estadísticas de producción de cultivos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [en línea] [consulta: julio de 2010] <<http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor>>
- Fischer, R.A. 1985. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *Journal of Agriculture Science, Cambridge* 105: 447-461.
- Fischer, R.A. 1993. Irrigated spring wheat and timing and amount of nitrogen fertilizer. II. Physiology of grain yield response. *Field Crops Research* 33: 57-80.
- Fismes, J.; P.C. Vong; A. Guckert and E. Frossard. 2000. Influence of sulfur on apparent N-use efficiency, yield and quality of oilseed rape (*Brassica napus* L.) grown on a calcareous soil. *European Journal of Agronomy* 12: 127-141.
- Fowler, D.B. and R.K. Downey. 1970. Lipid and morphological changes in developing rapeseed, *Brassica napus*. *Canadian Journal of Plant Science* 50: 233-247.
- Galantini, J.A.; N. Senesi, G. Brunetti and R. Rosell, 2004. Influence of texture on the nitrogen and sulphur status and organic matter quality and distribution in semiarid Pampean grassland soils. *Geoderma* 123: 143-152.
- Gambaudo, S. y H. Fontanetto. 2008. Fertilización de colza en la región central de Santa Fe. pp. 77-85. En: Cultivo de colza. Iriarte y Valetti (Eds.). *Chacra Experimental integrada Barrow - INTA*. 156p.

- Gammelvind, L.H.; J.K. Schjoerring; V.O. Mogensen; C.R. Jensen and J.H.G. Bock. 1996. Photosynthesis in leaves and siliques of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Plant Soil* 186: 227-236.
- Gan, Y.; S.S. Malhi; S. Brandt; F. Katepa-Mupondwa and C. Stevenson. 2008. Nitrogen use efficiency and nitrogen uptake of juncea canola under diverse environments. *Agronomy Journal* 100: 285-295.
- Gao, J.; K.D. Thelen, D.H. Min, S. Smith, X. Hao and R. Gehl. 2010. Effects of manure and fertilizer applications on canola oil content and fatty acid composition. *Agronomy Journal* 102: 790-797.
- Garcés, R.; C. Sarmiento and M. Mancha. 1992. Temperature regulation of oleate desaturase in sunflower seeds. *Planta* 186: 461-465.
- Giller, K.E.; P. Chalk; A. Dobermann; L. Hammond; P. Heffer; J.K. Ladha; P. Nyamudeza; L. Maene; H. Ssali and J. Freney. 2004. Emerging technologies to increase the efficiency of use of fertilizer nitrogen. In: Mosier, A.R., Syers, K.J., Freney, J.R. (Eds.), *Agriculture and the Nitrogen Cycle*. Island Press, Washington, USA, pp. 35-51.
- Gómez, N.V. 2007. Respuestas al fotoperíodo y a la vernalización en etapas vegetativas y reproductivas en colza-canola: Efecto sobre el rendimiento y sus componentes. Tesis para optar al grado de Magister de la Universidad de Buenos Aires. Escuela para Graduados, Facultad de Agronomía. Univesridad de Buenos Aires. 86p.
- Gómez, N.V. y D.J. Miralles. 2006. Colza. En: Cultivos industriales. Eds. de la Fuente, E. B., A. Gil, P. I. Giménez, A.G. Kantolic, M. López Pereira, E.L. Ploschuk, D.M. Sorlino, M. P. Vilariño, D.F. Wassner y L.B. Windauer. *Editorial Facultad de Agronomía*, Buenos Aires. pp 183-216.
- Gosse, G.; M. Rollier; J.C Rode and M. Chartier. 1983. Vers une modelisation de la production chez le colza de printemps. *Actes du 6eme Congrès International sur le Colza*, 17-19 de mayo de 1983, Paris. Tome 1: 116-123.
- Grant, C.A. and L.D. Bailey. 1993. Fertility management in canola production. *Canadian Journal of Plant Science* 73 (3): 651-670.
- Habekotté, B. 1997a. Identification of strong and weak yield determining components of winter oilseed rape compared with winter wheat. *European Journal of Agronomy* 7: 315-321.
- Habekotté, B. 1997b. Options for increasing seed yield of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): a simulation study. *Field Crops Research* 54: 109-126.
- Hansen, F. 1994. Die energetische Bewertung von Ertrag und Ertragsbildung verschiedener Kulturarten in einer Getreide/Ölfrucht-Rotation auf der Basis der Strahlungs und Stickstoffnutzung im Bestand. Ph.D. Thesis. Christian -Albrechts - University, Faculty of Agriculture, Kiel.
- Hill, L.M.; E.R. Morley-Smith and S. Rawsthorne. 2003. Metabolism of sugars in the endosperm of developing seeds of oilseed rape. *Plant Physiology* 131: 228-236.
- Hocking, P. and M. Stapper. 1993. Effects of sowing time and nitrogen fertilizer rate on growth, yield and nitrogen accumulation of canola, mustard and wheat. *Proceedings 9th Australian Research Assembly on Brassicas*, Wagga Wagga, New South Wales. pp. 33-44.
- Hocking, P.J. and L. Mason. 1993. Accumulation, distribution and redistribution of dry matter and mineral nutrients in fruits of canola (oilseed rape), and the effects of nitrogen fertilizer and windrowing. *Australian Journal of Agricultural Research* 44: 1377-1388.
- Hocking, P.J. and M. Stapper. 2001. Effects of sowing time and nitrogen fertiliser on canola and wheat, and nitrogen fertiliser on Indian mustard. II. Nitrogen

- concentrations, N accumulation, and N fertiliser use efficiency. *Australian Journal of Agricultural Research* 52: 635–644.
- Hocking, P.J.; P.J. Randall and D. DeMarco. 1997. The response of dryland canola to nitrogen fertilizer: partitioning and mobilization of dry matter and nitrogen, and nitrogen effects on yield components. *Field Crops Research* 54: 201-220.
- Holmes, M.R.J. and A.M. Ainsley. 1977. Fertilizer requirements of Spring oil-seed rape. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 28: 301-311.
- Ibrahim, A.F.; E.O. Abustait and El.-M.A.El- Metwally. 1989. Response of rapeseed (*Brassica napus* L.) growth, yield, oil content and its fatty acids to nitrogen rates and application times. *Journal of Agronomy and Crop Science* 162: 107-112.
- Iglesias, F. 2006. Limitación por fuente en colza 00, diferencias genotípicas y ambientales. Tesis para optar al grado de Magister de la Universidad de Buenos Aires. Escuela para Graduados, Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. 162 pp.
- INTA. 2010. Estadística agroclimática decadal interactiva. Instituto de Clima y Agua, INTA Castelar. [en línea] [consulta: julio de 2010] <<http://www.intacya.org/>>
- IPNI. 2010. Planilla de cálculos para estimar requerimientos nutricionales de cultivos de cereales, oleaginosos, forrajeras e industriales. *IPNI Cono Sur*. International Plant Nutrition Institute [en línea] [consulta: julio de 2010] <[http://ipni.net/ppiweb/ltams.nsf/\\$webindex/C7CAE45A06EC30D803256B22006C3F4D](http://ipni.net/ppiweb/ltams.nsf/$webindex/C7CAE45A06EC30D803256B22006C3F4D)>
- Iriarte, L.B. 2004. Evaluación cultivares de colza en distintas fechas de siembra campaña 2004/05. Estación Experimental Integrada Barrow (INTA-MAA). [en línea] [consulta: julio de 2010] <<http://www.inta.gov.ar/barrow/info/indices/tematica/colza.htm>>
- Iriarte, L.B. 2005. Colza fechas de siembra campaña 2005/06. Estación Experimental Integrada Barrow (INTA-MAA). [en línea] [consulta: julio de 2010] <<http://www.inta.gov.ar/barrow/info/indices/tematica/colza.htm>>
- Iriarte, L.B. 2006. Evaluación cultivares campaña 2006. Estación Experimental Integrada Barrow (INTA-MAA). [en línea] [consulta: julio de 2010] <<http://www.inta.gov.ar/barrow/info/indices/tematica/colza.htm>>
- Iriarte, L.B; Z.B. López y C. Appella. 2006. Red Nacional de Evaluación de cultivares de colza. Estación Experimental Integrada Barrow (INTA-MAA). [en línea] [consulta: julio de 2010] <<http://www.inta.gov.ar/barrow/info/indices/tematica/colza.htm>>
- Iriarte, L.B; Z.B. López y C. Appella. 2007. Red Nacional de Evaluación de cultivares de colza. Estación Experimental Integrada Barrow (INTA-MAA). [en línea] [consulta: julio de 2010] <<http://www.inta.gov.ar/barrow/info/indices/tematica/colza.htm>>
- Iriarte, L.B; Z.B. López y C. Appella. 2008. Red Nacional de Evaluación de cultivares de colza. Estación Experimental Integrada Barrow (INTA-MAA). [en línea] [consulta: julio de 2010] <<http://www.inta.gov.ar/barrow/info/indices/tematica/colza.htm>>
- Izquierdo, N.; L. Aguirrezábal; F. Andrade and V. Pereyra. 2002. Night temperature affects fatty acid composition in sunflower oil depending on the hybrid and the phenological stage. *Field Crops Research* 77: 115–126.
- Izquierdo, N.; M. Pereyra Iraola; S. Nolasco y L. Aguirrezábal. 2005. Porcentaje y calidad de aceite en canola. Efecto de la radiación solar interceptada por planta. *XI Congreso Latinoamericano de Grasas y Aceites*. Rosario, Argentina.

- Izquierdo, N.G.; L.A.N. Aguirrezábal; F.H. Andrade and M.G. Cantarero. 2006. Modeling the response of fatty acid composition to temperature in a traditional sunflower hybrid. *Agronomy Journal* 98: 451-461.
- Izquierdo, N.G.; L.A.N. Aguirrezábal; F.H. Andrade; C. Geroudet; O. Valentinuz and M. Pereyra Iraola. 2009. Intercepted solar radiation affects oil fatty acid composition in crop species. *Field Crops Research* 114: 66-74.
- Jackson, G.D. 2000. Effects of nitrogen and sulfur on canola yield and nutrient uptake. *Agronomy Journal* 92: 644-649.
- Jandel TBLCURVE Scientific. 1991. Table Curve v 3.0. User's manual version 3.0. AISN software. Jandel Scientific, Corte Madera, CA.
- Jedel, P.E.; L.E. Evans y R. Scarth. 1986. Vernalization responses of a selected group of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. *Canadian Journal of Plant Science* 66, 1-9.
- Jensen, C.R.; V.O. Mogensen; G. Mortensen; J.K. Fieldsend; G.F.J. Milford; M.N. Andersen and J.H. Thage. 1996. Seed glucosinolate, oil and protein contents of field-grown rape (*Brassica napus* L.) affected by soil drying and evaporative demand. *Field Crops Research* 47: 93-105.
- Joshi, N.L.; P. C. Mali and A. Saxena. 1998. Effect of Nitrogen and Sulphur Application on Yield and Fatty acid Composition of Mustard (*Brassica juncea* L.) Oil. *Journal of Agronomy and Crop Science* 180: 59-63.
- Justes, E.; P. Denoroy; B. Gabrielle and G. Gosse. 2000. Effect of crop nitrogen status and temperature on the radiation use efficiency of winter oilseed rape. *European Journal of Agronomy* 13: 165-177.
- Kamh, M.; F. Wiesler; A. Ulas and W.J. Horst. 2005. Root growth and N-uptake activity of oilseed rape (*Brassica napus* L.) cultivars differing in nitrogen efficiency. *Journal of Pant Nutrition* 168: 130-137.
- Karamanukian, R. 2010. Generación del rendimiento en cultivares invernales y primaverales de canola (*Brassica napus* L.). Trabajo de intensificación para optar por el grado de Ingeniero Agrónomo. FAUBA. (En evaluación).
- Kindred D.R and M. J. Gooding. 2004. Heterotic and seed rate effects on nitrogen efficiencies in wheat. *Journal of Agricultural Science* 142: 639-657.
- Le Gouis, J.; D. Be'ghin, E. Heumez and P. Pluchard. 2000. Genetic differences for nitrogen uptake and nitrogen utilisation efficiencies in winter wheat. *European Journal of Agronomy* 12: 163-173.
- Leach, J.E.; G.F.J. Milford; L.A. Mullen; T. Scott and H. J. Stevenson. 1989. Accumulation of dry matter in oilseed rape crops in relation to the reflection and absorption of solar radiation by different canopy structures. *Aspect Applied Biology* 23: 117-123.
- Longnecker, N.E.; E.J.M. Kirby and A.D. Robson. 1993. Leaf emergence, tiller growth and apical development of nitrogen-deficient spring wheat. *Crop Science* 33: 154-160.
- Loomis, R.S. and D.J. Connor. 1992. Crop ecology: productivity and management in agricultural systems. Cambridge University Press, Melksham - UK. 538p.
- Magrin, G.O.; A.J. Hall; C. Baldy and M.O. Grondona. 1993. Spatial and interannual variations in the photothermal quotient: implications for the potential kernel number of wheat crops in Argentina. *Agricultural and Forest Meteorology* 67: 29-41.
- MAGyP. 2010. Estadísticas de producción de cultivos. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca [en línea] [consulta: julio de 2010] <<http://www.minagri.gob.ar/>>

- Malagoli, P.; P. Laine; L. Rossato and A. Ourry. 2005. Dynamics of nitrogen uptake and mobilization in field-grown winter oilseed rape from stem elongation to harvest. I. Dynamics of nitrogen uptake and mobilization in field-grown winter oilseed rape from stem elongation to harvest. *Annals of Botany* 95: 853-861.
- Malhi, S.S.; Y. Gan, and J.P. Raney. 2007. Yield, seed quality, and sulfur uptake of brassica oilseed crops in response to sulfur fertilization. *Agronomy Journal* 99:570-577.
- Martre, P.; J.R. Porter; P.H. Jamieson and E. Triboï. 2003. Modeling grain nitrogen accumulation and protein composition to understand the sink/source regulations of nitrogen remobilization for wheat. *Plant Physiology* 133: 1959-1967.
- Martre, P.; P.H. Jamieson; M.A. Semenov; R.F. Zyskowski and E. Triboï. 2006. Modelling nitrogen uptake and redistribution and grain protein composition for wheat. *European Journal of Agronomy* 25: 138-154.
- Massignam, A.M.; S.C. Chapman; G.L. Hammer and S. Fukai. 2009. Physiological determinants of maize and sunflower grain yield as affected by nitrogen supply. *Field Crops Research* 113: 256-267.
- Matsuda, O.; H. Sakamoto; T. Hashimoto and K. Iba. 2005. A temperature-sensitive mechanism that regulates post-translational stability of a plastidial omega-3 fatty acid desaturase (FAD8) in Arabidopsis leaf tissues. *Journal of Biological Chemistry* 280 (5): 3597-3604.
- McDonald, B.E. 1995. Oil properties of importance in human nutrition. En: Brassica Oilseed. Production and Utilization. D. Kimber and D.I. McGregor (Eds). *CAB International*. pp 394.
- Mendham, N.J. and P.A. Salisbury. 1995. Physiology: crop development, growth and yield. In: Brassica oilseeds - Production and utilization. Eds. Kimber D and McGregor DI. *CAB International*, Cambridge. pp 11-64.
- Mendham, N.J.; P. Shypway and R. Scott. 1981. The effects of delayed sowing and weather on growth, development and yield of winter oil-seed rape (*Brassica napus* L.). *Journal Agricultural Science, Cambridge* 96: 389-416.
- Merrien, A. 2005. Contribution à l'explication de la variabilité de la teneur en acide linoléique chez le colza d'hiver culture en France. *Rencontres annuelles du CETIOM*. Décembre 2005. 75-90.
- Mingeau, M. 1974. Comportement du colza e printemps a la sécheresse. *Informations Techniques*, Paris, France. 36:1-11.
- Miralles, D.J.; N.V. Gómez; M.P. Vilariño; M.B. Agosti; D. de Abelleira. 2009. CRONOCANOLA©. Sistema experto para predecir fenología en Canola (www.agro.uba.ar/catedras/cerealicultura/servicios). Registro de Propiedad Intelectual 783214/09.
- Munshi, S.K.; V. Seema; K.S. Dhillon and P.S. Sukhija. 1990. Lipid biosynthesis in seeds of mustard (*Brassica juncea*) influenced by zinc and sulphur deficiency. *Physiologia Plantarum* 80: 102-108.
- Murphy, G.M. y N.C. Pascale. 1990. Agroclimatología de la Colza de Primavera (*Brassica napus* L. Ssp. Oleifera (Metz) Sinsk f. Annu) y su posible difusión en la Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 10: 159-176.
- Murphy, L. and R. Scarth. 1991. Vernalization response of spring canola (*Brassica napus* L.) In: Mc Gregor DI (ed.). *Proceedings of the Eight International Rapeseed Congress*. Saskatoon, Saskatchewan, Canadá. pp. 1764-1768.
- Nanda, R.; S.C. Bhargava and H.M. Rawson. 1995. Effect of sowing date on rates of leaf appearance, final leaf numbers and areas in *Brassica campestris*, *B. juncea*, *B. napus* and *B. carinata*. *Field Crops Research* 42: 125-134

- Nelson, D.W. and L.E. Sommers. 1973. Determination of total nitrogen in plant material. *Agronomy Journal* 65: 109-112.
- Norma VII SAGPyA 1075/94. 1994. Normas de comercialización de colza-canola. Ministerio de Agricultura, Ganadería, y Pesca. [en línea] [consulta: julio de 2010] <<http://www.minagri.gob.ar/site/index.php>>
- Ogunlela, V.B.; A. Kullmann and G. Geisler. 1990. Nitrogen distribution and dry matter accumulation in oilseed rape (*Brassica napus* L.) as influenced by N nutrition. *Journal of Agronomy and Crop Science* 164: 321-333.
- OIL WORLDS. 2010. Estadísticas. The Independent Forecasting Service for Oilseeds, Oils & Meals [en línea] [consulta: julio de 2010] <<http://www.oilworld.biz/app.php?ista=6013b45b6f5633f4921e1a8d9670defd>>
- Olsson, G. 1960. Self-incompatibility and outcrossing in rape and white mustard. *Hereditas* 46: 241-252.
- Otegui M.E. and G.A. Slafer. 2000. Physiological bases for maize improvement. The Haworth Press, NY. 217p.
- Peltonen-Sainio, P. and L. Jauhiainen. 2008. Association of growth dynamics, yield components and seed quality in long-term trials covering rapeseed cultivation history at high latitudes. *Field Crops Research* 108: 101-108.
- Peltonen-Sainio, P.; L. Jauhiainen, M. Hyövelä and E. Nissilä. 2011. Trade-off between oil and protein in rapeseed at high latitudes: Means to consolidate protein crop status?. *Field Crops Research* 121: 248-255.
- Penning de Vries, F.W.T.; H.H. Van Laar and M.C.M. Chardon. 1983. Bioenergetics of growth of seed, fruits and storage organs. In: Potential Productivity of Field Crops Under Different Environments. Eds. W.H. Smith and S.J. Banta. *International Rice Research Institute*, Los Baños. pp 37-60.
- Poggio, S.L.; E.H. Satorre; S. Dethiou y G.M. Gonzalo. 2005. Pod and seed numbers as a function of photothermal quotient during the seed set period of field pea (*Pisum sativum*) crops. *European Journal of Agronomy* 22: 55-69.
- Pritchard, F.M.; H.A. Eagles; R.M. Norton; P.A. Salisbury and M. Nicolas. 2000. Environmental effects on seed composition of Victorian canola. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 40: 679-685.
- Rakow, G. and D.I. McGregor. 1975. Oil, fatty acid and chlorophyll accumulation in developing seed of two "linolenic acid lines" of low erucic acid rapeseed. *Canadian Journal of Plant Science* 55: 197-203.
- Rao, M.S.S. and N.J. Mendham. 1991. Soil-plant-water relations of oilseed rape (*Brassica napus* and *B. campestris*). *Journal Agricultural Science, Cambridge* 117: 197-205.
- Rathke, G.W. and C. Scuster. 2001. Yield and quality of winter oilseed rape related to nitrogen supply. In: Plan nutrition: Food Security and Sustainability of Agro-Ecosystems through Basic and Applied Research. Horst, W.J. et al. (Eds.). *Kluwer Academic Publishers*, Dordrecht. pp. 798-799.
- Rathke, G.W.; O. Christen and W. Diepenbrock. 2005. Effects of nitrogen source and rate on productivity and quality of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) grown in different crop rotations. *Field Crops Research* 94: 103-113.
- Rieger, M.A.; M. Lamond; C. Preston; S.B. Powles and R.T. Roush. 2002. Pollen-mediated movement of herbicide resistance between commercial canola fields. *Science* 296: 2386-2388.
- Robertson, M.J. and J.F. Holland. 2004. Production risk of canola in the semi-arid subtropics of Australia. *Australian Journal of Agricultural Research* 55: 525-538.

- Robson, A.D.; L.D. Osborne; K. Snowball and W.J. Simmons. 1995. Assessing sulfur status in lupins and wheat. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 35: 79-86.
- Rode, J.C.; Gosse, G. and M. Chartier. 1983. Vers une modélisation de la production de graines du colza de printemps. *Informations Techniques*. CETIOM 82: 10-20.
- Rodríguez, D.; G.E. Santa María and M.C. Pomar. 1994. Phosphorus deficiency affects the early development of wheat plants. *Journal of Agronomy and Crop Science* 173: 69-72.
- Rondanini, D.; A. Mantese; R. Savin and A.J. Hall. 2006. Responses of sunflower yield and grain quality to alternating day/night high temperature regimes during grain filling: Effects of timing, duration and intensity of exposure to stress. *Field Crops Research* 96: 48-62.
- Rondanini, D.P.; I. Hernández Vieyra; M.P. Vilariño y D.J. Miralles. 2010. Respuestas del rendimiento y la calidad de grano de colza-canola (*Brassica napus* L.) al estrés lumínico post-floración. XXVIII Reunion Argentina de Fisiología Vegetal. La Plata, 26-29 Septiembre 2010.
- Rood, S.B.; D.J. Major and W.A. Charnetski. 1984. Seasonal changes in $^{14}\text{CO}_2$ assimilation and ^{14}C translocation in oilseed rape. *Field Crops Research* 8: 341-348.
- Rossato, L.; P. Laince and A. Ourry. 2001. Nitrogen storage and remobilization in *Brassica napus* L. during the growth cycle: nitrogen fluxes within the plant and changes in soluble protein patterns. *Journal of Experimental Botany* 52: 1655-1663.
- Rubio, G.; J.D. Scheiner; M.A. Taboada y R.S. Lavado. 2007. Distribución de nitrógeno, fósforo y azufre en un cultivo de colza: efectos sobre el ciclado de nutrientes. *Ciencia del Suelo* 25 (2): 189-194.
- Ryan, S.A. 1979. Genetic and environmental variation in the protein content of rapeseed meal. Thesis for Doctor of Philosophy, University of W.A.
- Salvagiotti, F.; J.M. Castellarín; D.J. Miralles and H.M. Pedrol. 2009. Sulfur fertilization improves nitrogen use efficiency in wheat by increasing nitrogen uptake. *Field Crops Research* 113: 170-177.
- Sana, M.; A. Ali; M.A. Malik; M.F. Saleem and M. Rafiq. 2003. Comparative yield potential and oil contents of different canola cultivars (*Brassica napus* L.). *Pakistan Journal of Agronomy* 2 (1): 1-7.
- Scarisbrick, D.; R. Daniels and M. Alcock. 1981. The effects of sowing date on the yield and yield components of spring oilseed rape. *Journal Agricultural Science, Cambridge* 97: 189-195.
- Schjoerring, J.K.; J.G.H. Bock; L. Gammelvind; C.R. Jensen and V.O. Mogensen. 1995. Nitrogen incorporation and remobilization in different shoot components of field-grown winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) as affected by rate of nitrogen application and irrigation. *Plant Soil* 177: 255-264.
- Schulte auf m Erley, G.; K. Wijaya; A. Ulas; H. Becker; F. Wiesler and W.J. Horst. 2007. Leaf senescence and N uptake parameters as selection traits for nitrogen efficiency of oilseed rape cultivars. *Physiologia Plantarum* 130: 519-531.
- Schulte, E.E. and B.G. Hopkins. 1996. Estimation of soil organic matter by weight loss-on-ignition. In: F.R. Magdoff *et al.* (eds.) Soil organic matter: Analysis and interpretation. *Soil Science Society of America Spec. Publ.* 46. SSSA, Madison, WI. pp 21-31.

- Scott, R.K.; E.A. Ogunremi; J.D. Irvins and N.J. Mendham. 1973. The effect of fertilizers and harvest date by growth and yield of oilseed rape sown in autumn and spring. *Journal Agricultural Science, Cambridge* 81: 287-293.
- Semenov, M.A. y J.R. Porter. 1995. Climatic variability and the modelling of crop yields. *Agricultural and Forest Meteorology* 73: 265-283.
- Sfascia, L. 2009. Los márgenes brutos del cultivo de colza. En: *A todo trigo 2009*. 14 y 15 de Mayo de 2009, Mar del Plata - Argentina. Prestación oral. [en línea] [consulta: julio de 2010] <<http://www.atodotrigo.com.ar/index.php>>
- Shafii, B.; K.A. Mahler; W.J. Price and D.L. Auld. 1992. Genotype \times Environment Interaction Effects on Winter Rapeseed Yield and Oil Content. *Crop Science* 32: 922-927.
- Si, P. and G. Walton. 2004. Determinants of oil concentration and seed yield in canola and Indian mustard in the lower rainfall areas of Western Australia. *Australian Journal of Agricultural Research* 55: 367-377.
- Si, P.; R.J. Mailer; N. Galwey and D.W. Turner. 2003. Influence of genotype and environment on oil and protein concentrations or canola (*Brassica napus* L.) grown across southern Australia. *Australian Journal of Agricultural Research* 54: 397-407.
- Sieling, K. and O. Christen. 1997. Effect of preceding crop combination and N fertilization on yield of six oilseed rape cultivars (*Brassica napus* L.). *European Journal of Agronomy* 7 (4): 301-306.
- Silvester-Bradley, R. and R.J. Makepeace. 1984. A code for stages of development in oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Aspects of Applied Biology* 6: 399-419.
- Sinclair, T. R. and T. Horie. 1989. Leaf nitrogen, photosynthesis and crop radiation use efficiency: a review. *Crop Science* 29: 90-98.
- Steer, B.T.; P.J. Hocking; A.A. Kortt and C.M. Roxburgh. 1984. Nitrogen nutrition of sunflower (*Helianthus annuus* L.): Yield components, the timing of their establishment and seed characteristics in response to nitrogen supply. *Field Crops Research* 9: 219-236.
- Stroehrer, V.L.; J.G. Boothe and A.G. Good. 1995. Molecular cloning and expression of a turgor-responsive gene in *Brassica napus*. *Plant Molecular Biology* 27: 541-551.
- Szeicz, G. 1974. Solar radiation for plant growth. *Journal of Applied Ecology* 11: 617-636.
- Tamagno, L.N.; A. M. Chamorro and S. J. Sarandón. 1999. Aplicación fraccionada de nitrógeno en colza (*Brassica napus* L. spp *oleifera* forma annua): efectos sobre el rendimiento y la calidad de la semilla. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata* 104: 25-34.
- Tayo, T.O. and D.G. Morgan. 1975. Quantitative Analysis on the Growth, Development and Distribution of Flowers and Pods in Oilseed Rape (*Brassica napus* L.). *Journal Agricultural Science, Cambridge* 85: 103-110.
- Thies, W. 1970. Chloroplast development and biogénesis of linolénico acid in ripening cotyledons of rapeseed. In: *Proceedings of the International Conference on the Science, Technology and Marketing of Rapeseed and Rapeseed Products*. Quebec, Canadá. 348-356.
- Timsina, J., Singh, U., Badaruddin, M., Meisner, C., Amin, M.R., 2001. Cultivar, nitrogen, and water effects on productivity, and nitrogen-use efficiency and balance for rice-wheat sequences of Bangladesh. *Field Crops Research* 72, 143-161.

- Trémolières, H.; A. Trémolières and P. Mazliak. 1978. Effect of light and temperature on fatty acid desaturation during the maturation of rapeseed. *Phytochemistry* 17: 685-687.
- Trémolières, A.; J.P. Dubacq and D. Drapier. 1982. Unsaturated fatty acids in maturing seeds of sunflower and rape: Regulation by temperature and light intensity. *Phytochemistry* 21: 41-45.
- Triboi, E. and A.M. Triboi-Blondel. 2002. Productivity and grain or seed composition: a new approach to an old problem-invited paper. *European Journal of Agronomy* 16: 163-186.
- Triboi-Blondel, A.M. and M. Renard. 1999. Effects of temperature and water stress on fatty acid composition of rapeseed oil. In: *Proceedings of the 10th International Rapeseed Congress*. Camberra, Australia. CD.
- Vermorel, M.; Heaney, R.K. and G.R. Fenwick. 1986. Nutritive value of rapeseed: Effects of individual glucosinolates. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 37: 1197-1202.
- Vilariño, M.P.; D.P. Rondanini y D.J. Miralles. 2009. Variabilidad en rendimiento y calidad en genotipos de canola (*Brassica napus* L) contrastantes en duración de ciclo. XXXII Jornadas Argentinas de Botánica. Huerta Grande, Córdoba 5-8 de octubre. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica* 44 (3-4): 78.
- Walton, G.; P. Si and B. Bowden. 1999. Environmental impact on canola yield and oil. In: *Proceedings of the 10th International Rapeseed Congress*. Camberra, Australia. CD.
- Werteker, M.; A. Lorenz; H. Johannes; E. Berghofer and C.S. Findlay. 2010. Environmental and varietal influences on the fatty acid composition of rapeseed, soybeans and sunflowers. *Journal of Agronomy and Crop Science* 196: 20-27.
- White, JW; G. Hoogenboom and L.A. Hunt. 2005. A structured procedure for assessing how crop models respond to temperature. *Agronomy Journal* 97: 426-439.
- Windauer L. y E.L. Ploschuk. 2006. Cultivos productores de aceite. En: Cultivos industriales. Eds. de la Fuente, E. B., A. Gil, P. I. Giménez, A.G. Kantolic, M. López Pereira, E.L. Ploschuk, D.M. Sorlino, M. P. Vilariño, D.F. Wassner y L.B. Windauer. *Editorial Facultad de Agronomía*, Buenos Aires. pp 63-94.
- Wright, G.C.; C.J. Smith and M.R. Woodroffe. 1988. The effect of irrigation and nitrogen fertilizer on rapeseed (*Brassica napus*) production in south-eastern Australia. *Irrigation Science* 9: 1-13.
- Zhao, F.J.; E.J. Evans; P.E. Bilsborrow and J.K. Syers. 1993. Influence of sulphur and nitrogen on seed yield and quality of low glucosinolate oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture* 63: 29-37.

Anexo 1

Tabla A.1. Duración de la etapa emergencia-inicio de floración (E-IF), inicio de floración-madurez fisiológica (IF-MF) y emergencia-madurez fisiológica (E-MF) en días y E-MF en tiempo térmico (°Cd) para diferentes materiales comerciales de colza-canola evaluados en Buenos Aires en dos años (2007 y 2008). Las filas grises corresponden a los genotipos de ciclo primavera corto, las filas blancas a los de ciclo primavera medio y las filas negras a los de ciclo invernal.

Material	2007				2008			
	E-IF (días)	IF-MF (días)	E-MF (días)	E-MF (°Cd/a)	E-IF (días)	IF-MF (días)	E-MF (días)	E-MF (°Cd/a)
<i>Fillal Precoz</i>	98 g	43 defg	141 f	1638	127 bcdefg	48 h	175 fghijkl	2502
<i>Rivette</i>	102 cdefg	41 efg	143 ef	1701	96 efg	58 bcdefgh	154 kl	2135
<i>Hyola 61</i>	98 fg	57 a	155 abcde	1925	93 efg	67 abc	160 jkl	2246
<i>Hyola 432</i>	98 g	51 abcd	149 ef	1779	82 g	69 ab	151 l	2092
<i>Bio Aureo 2486</i>	101 efg	54 ab	155 abcde	1925	90 fg	81 a	171 ghijkl	2420
<i>SW 5262*</i>	ND	ND	ND	ND	101 defg	64 abcd	165 ikl	2311
<i>SRM 2836</i>	100 efg	54 abc	154 bcdef	1908	113 cdefg	62 abcdef	175 fghijkl	2502
<i>Legacy</i>	104 bcdefg	48 abcdef	152 cdef	1898	112 cdefg	65 abcd	177 efghijkl	2534
<i>Impact</i>	102 defg	51 abcd	153 cdef	1908	127 bcdefg	51 gh	178 defghijkl	2549
<i>Foremost</i>	106 abcdef	49 abcde	155 abcde	1925	115 cdefg	65 abcd	180 cdefghijkl	2585
<i>Eclipse</i>	103 cdefg	51 abcd	154 bcdef	1898	128 abcdef	59 abcdefgh	187 abcdefghi	2727
<i>SW 2797</i>	104 bcdefg	56 a	160 abcd	2002	129 abcdef	52 fgh	181 bcdefghijkl	2606
<i>Gladiator</i>	103 cdefg	49 abcde	152 def	1993	134 abcd	60 abcdefg	194 abcde	2865
<i>Fillal UofA</i>	109 abcde	39 efg	148 ef	1794	130 abcde	56 cdefgh	186 abcdefghij	2706
<i>BioIza 440</i>	112 abcd	47 bcdefg	159 abcd	1988	128 abcdef	60 abcdefg	188 abcdefgh	2750
<i>BioAureo 2386</i>	102 cdefg	49 abcde	151 def	1868	90 fg	77 ab	167 hijkl	2355
<i>Jura</i>	107 abcde	45 defg	152 cdef	1889	134 abcd	50 gh	184 abcdefghijk	2664
<i>Pacha*</i>	ND	ND	ND	ND	135 abc	55 defgh	190 abcdefg	2786
<i>CMS*</i>	ND	ND	ND	ND	137 abc	55 defgh	192 abcdef	2823
<i>SW Gospel</i>	128 ab	45 cdefg	173 a	2249	168 a	50 gh	218 abc	3453
<i>Pulsar</i>	124 abc	39 efg	163 abc	2088	162 ab	53 efg	215 abcd	3367
<i>Barrel</i>	131 a	38 fg	169 ab	2155	163 ab	63 abcde	226 a	3637
<i>Teddy</i>	127 ab	36 g	163 abc	2070	164 ab	56 cdefgh	220 ab	3513
<i>SW 370*</i>	ND	ND	ND	ND	160 ab	49 h	209 abcde	3215

Nota: * Genotipos solo incluidos en el año 2008. ND: Datos no disponibles. Letras distintas indican diferencias significativas entre genotipos en el año 2008 ($p < 0,05$). En el año 2007 no se pudo realizar el análisis estadístico por no poseer repeticiones verdaderas.

Anexo 2**Extracción de raíces**

Fig. A.2. Fotografías explicativas de la extracción de raíces de los contenedores.

Anexo 3

Salida *InfoStat* para la Biomasa Aérea Total en g m⁻² año 2006:

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
BAT 2006	24	0,64	0,48	12,27

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	445457,88	7	63636,84	4,06	0,0097
N	300384,38	1	300384,38	19,15	0,0005
S	3224,80	1	3224,80	0,21	0,6564
Genotipo	90135,53	1	90135,53	5,75	0,0291
N*S	1757,88	1	1757,88	0,11	0,7422
N*Genotipo	29428,01	1	29428,01	1,88	0,1897
S*Genotipo	20486,73	1	20486,73	1,31	0,2699
N*S*Genotipo	40,56	1	40,56	2,6E-03	0,9601
Error	250999,99	16	15687,50		
Total	696457,87	23			

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=108,39708

Error: 15687,4992 gl: 16

N	Medias	n	
1	1132,60	12	A
0	908,85	12	B

Letras distintas indican diferencias significativas(p<= 0,05)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=108,39708

Error: 15687,4992 gl: 16

S	Medias	n	
1	1032,32	12	A
0	1009,13	12	A

Letras distintas indican diferencias significativas(p<= 0,05)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=108,39708

Error: 15687,4992 gl: 16

Genotipo	Medias	n	
Eclipse	1082,01	12	A
Filial	959,44	12	B

Letras distintas indican diferencias significativas(p<= 0,05)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=153,29662

Error: 15687,4992 gl: 16

N	S	Medias	n	
1	1	1152,75	6	A
1	0	1112,45	6	A
0	1	911,88	6	B
0	0	905,82	6	B

Letras distintas indican diferencias significativas(p<= 0,05)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=153,29662

Error: 15687,4992 gl: 16

N	Genotipo	Medias	n	
1	Eclipse	1228,90	6	A
1	Filial	1036,30	6	B
0	Eclipse	935,12	6	B
0	Filial	882,58	6	C

Letras distintas indican diferencias significativas(p<= 0,05)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=153,29662

Error: 15687,4992 gl: 16

S	Genotipo	Medias	n	
1	Eclipse	1122,82	6	A
0	Eclipse	1041,20	6	A B
0	Filial	977,07	6	A B
1	Filial	941,82	6	B

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0,05$)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=216,79416

Error: 15687,4992 gl: 16

N	S	Genotipo	Medias	n	
1	1	Eclipse	1276,97	3	A
1	0	Eclipse	1180,83	3	A B
1	0	Filial	1044,07	3	B C
1	1	Filial	1028,53	3	B C
0	1	Eclipse	968,67	3	B C
0	0	Filial	910,07	3	C
0	0	Eclipse	901,57	3	C
0	1	Filial	855,10	3	C

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0,05$)

Salida InfoStat para la Biomasa Aérea Total en g m^{-2} año 2007:

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
BAT 2007	24	0,51	0,30	18,44

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	551896,36	7	78842,34	2,40	0,0693
N	416409,07	1	416409,07	12,70	0,0026
S	27682,83	1	27682,83	0,84	0,3718
Genotipo	48753,12	1	48753,12	1,49	0,2404
N*S	1065,33	1	1065,33	0,03	0,8592
N*Genotipo	2130,05	1	2130,05	0,06	0,8021
S*Genotipo	55767,40	1	55767,40	1,70	0,2106
N*S*Genotipo	88,55	1	88,55	2,7E-03	0,9592
Error	524641,70	16	32790,11		
Total	1076538,06	23			

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=156,71557

Error: 32790,1063 gl: 16

N	Medias	n	
1	1113,47	12	A
0	850,03	12	B

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0,05$)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=156,71557

Error: 32790,1063 gl: 16

S	Medias	n	
0	1015,71	12	A
1	947,78	12	A

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0,05$)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=156,71557

Error: 32790,1063 gl: 16

Genotipo	Medias	n	
Eclipse	1026,82	12	A
Filial	936,68	12	A

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0,05$)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=221,62928

Error: 32790,1063 gl: 16

N	S	Medias	n
---	---	--------	---

1	0	1140,77	6	A		
1	1	1086,17	6	A	B	
0	0	890,65	6		B	C
0	1	809,40	6			C

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0,05$)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=221,62928

Error: 32790,1063 gl: 16

N	Genotipo	Medias	n			
1	Eclipse	1149,12	6	A		
1	Filial	1077,82	6	A	B	
0	Eclipse	904,52	6		B	C
0	Filial	795,53	6			C

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0,05$)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=221,62928

Error: 32790,1063 gl: 16

S	Genotipo	Medias	n	
0	Eclipse	1108,98	6	A
1	Filial	950,92	6	A
1	Eclipse	944,65	6	A
0	Filial	922,43	6	A

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0,05$)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=313,43113

Error: 32790,1063 gl: 16

N	S	Genotipo	Medias	n		
1	0	Eclipse	1222,70	3	A	
1	1	Filial	1096,80	3	A	B
1	1	Eclipse	1075,53	3	A	B
1	0	Filial	1058,83	3	A	B
0	0	Eclipse	995,27	3	A	B
0	1	Eclipse	813,77	3		B
0	1	Filial	805,03	3		B
0	0	Filial	786,03	3		B

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0,05$)

Salida InfoStat para la Biomasa Aérea Total en g m⁻² año 2008:

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
BAT 2008	24	0,86	0,80	12,93

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2292216,44	7	327459,49	14,30	<0,0001
N	2124269,00	1	2124269,00	92,74	<0,0001
S	273,37	1	273,37	0,01	0,9144
Genotipo	89841,61	1	89841,61	3,92	0,0651
N*S	775,21	1	775,21	0,03	0,8563
N*Genotipo	68629,82	1	68629,82	3,00	0,1027
S*Genotipo	6793,93	1	6793,93	0,30	0,5935
N*S*Genotipo	1633,50	1	1633,50	0,07	0,7928
Error	366470,84	16	22904,43		
Total	2658687,28	23			

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=130,97863

Error: 22904,4275 gl: 16

N	Medias	n	
1	1467,86	12	A
0	872,84	12	B

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0,05$)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=130,97863

Error: 22904,4275 gl: 16

S	Medias	n	
0	1173,73	12	A
1	1166,98	12	A

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0,05$)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=130,97863

Error: 22904,4275 gl: 16

Genotipo	Medias	n	
Eclipse	1231,53	12	A
Filial	1109,17	12	A

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0,05$)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=185,23176

Error: 22904,4275 gl: 16

N	S	Medias	n	
1	0	1476,92	6	A
1	1	1458,80	6	A
0	1	875,15	6	B
0	0	870,53	6	B

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0,05$)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=185,23176

Error: 22904,4275 gl: 16

N	Genotipo	Medias	n	
1	Eclipse	1582,52	6	A
1	Filial	1353,20	6	B
0	Eclipse	880,55	6	C
0	Filial	865,13	6	C

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0,05$)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=185,23176

Error: 22904,4275 gl: 16

S	Genotipo	Medias	n	
1	Eclipse	1244,98	6	A
0	Eclipse	1218,08	6	A
0	Filial	1129,37	6	A
1	Filial	1088,97	6	A

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0,05$)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=261,95726

Error: 22904,4275 gl: 16

N	S	Genotipo	Medias	n	
1	1	Eclipse	1598,53	3	A
1	0	Eclipse	1566,50	3	A B
1	0	Filial	1387,33	3	A B
1	1	Filial	1319,07	3	B
0	1	Eclipse	891,43	3	C
0	0	Filial	871,40	3	C
0	0	Eclipse	869,67	3	C
0	1	Filial	858,87	3	C

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0,05$)

Anexo 4**Salida InfoStat para el Rendimiento en g m⁻² año 2006:****Análisis de la varianza**

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
REND 2006	24	0,50	0,29	17,25

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	40532,94	7	5790,42	2,32	0,0773
N	31370,97	1	31370,97	12,58	0,0027
S	75,97	1	75,97	0,03	0,8636
Genotipo	5781,51	1	5781,51	2,32	0,1474
N*S	174,42	1	174,42	0,07	0,7948
N*Genotipo	1899,26	1	1899,26	0,76	0,3958
S*Genotipo	1052,05	1	1052,05	0,42	0,5253
N*S*Genotipo	178,76	1	178,76	0,07	0,7923
Error	39910,67	16	2494,42		
Total	80443,61	23			

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=43,22403

Error: 2494,4167 gl: 16

N	Medias	n	
1	325,63	12	A
0	253,32	12	B

Letras distintas indican diferencias significativas(p<= 0,05)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=43,22403

Error: 2494,4167 gl: 16

S	Medias	n	
1	291,25	12	A
0	287,69	12	A

Letras distintas indican diferencias significativas(p<= 0,05)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=43,22403

Error: 2494,4167 gl: 16

Genotipo	Medias	n	
Filial	304,99	12	A
Eclipse	273,95	12	A

Letras distintas indican diferencias significativas(p<= 0,05)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=61,12800

Error: 2494,4167 gl: 16

N	S	Medias	n	
1	1	330,10	6	A
1	0	321,15	6	A
0	0	254,23	6	B
0	1	252,40	6	B

Letras distintas indican diferencias significativas(p<= 0,05)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=61,12800

Error: 2494,4167 gl: 16

N	Genotipo	Medias	n	
1	Filial	332,25	6	A
1	Eclipse	319,00	6	A
0	Filial	277,73	6	A B
0	Eclipse	228,90	6	B

Letras distintas indican diferencias significativas(p<= 0,05)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=61,12800

Error: 2494,4167 gl: 16

S	Genotipo	Medias	n	
0	Filial	309,83	6	A

1	Filial	300,15	6	A
1	Eclipse	282,35	6	A
0	Eclipse	265,55	6	A

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=86,44805

Error: 2494,4167 gl: 16

N	S	Genotipo	Medias	n			
1	1	Filial	332,83	3	A		
1	0	Filial	331,67	3	A		
1	1	Eclipse	327,37	3	A		
1	0	Eclipse	310,63	3	A	B	
0	0	Filial	288,00	3	A	B	C
0	1	Filial	267,47	3	A	B	C
0	1	Eclipse	237,33	3		B	C
0	0	Eclipse	220,47	3			C

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Salida InfoStat para el Rendimiento en g m⁻² año 2007:

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
REND 2007	24	0,54	0,34	18,30

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	61274,53	7	8753,50	2,70	0,0472
N	49904,64	1	49904,64	15,41	0,0012
S	2046,11	1	2046,11	0,63	0,4383
Genotipo	552,96	1	552,96	0,17	0,6849
N*S	47,60	1	47,60	0,01	0,9050
N*Genotipo	36,01	1	36,01	0,01	0,9173
S*Genotipo	8610,88	1	8610,88	2,66	0,1225
N*S*Genotipo	76,33	1	76,33	0,02	0,8799
Error	51808,51	16	3238,03		
Total	113083,05	23			

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=49,24717

Error: 3238,0321 gl: 16

N	Medias	n	
1	356,58	12	A
0	265,38	12	B

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=49,24717

Error: 3238,0321 gl: 16

S	Medias	n	
0	320,21	12	A
1	301,74	12	A

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=49,24717

Error: 3238,0321 gl: 16

Genotipo	Medias	n	
Eclipse	315,78	12	A
Filial	306,18	12	A

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=69,64602

Error: 3238,0321 gl: 16

N	S	Medias	n	
1	0	367,22	6	A

1	1	345,93	6	A
0	0	273,20	6	B
0	1	257,55	6	B

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=69,64602

Error: 3238,0321 gl: 16

N	Genotipo	Medias	n	
1	Eclipse	362,60	6	A
1	Filial	350,55	6	A
0	Eclipse	268,95	6	B
0	Filial	261,80	6	B

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=69,64602

Error: 3238,0321 gl: 16

S	Genotipo	Medias	n	
0	Eclipse	343,95	6	A
1	Filial	315,88	6	A
0	Filial	296,47	6	A
1	Eclipse	287,60	6	A

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=98,49434

Error: 3238,0321 gl: 16

N	S	Genotipo	Medias	n				
1	0	Eclipse	390,40	3	A			
1	1	Filial	357,07	3	A	B		
1	0	Filial	344,03	3	A	B	C	
1	1	Eclipse	334,80	3	A	B	C	D
0	0	Eclipse	297,50	3	A	B	C	D
0	1	Filial	274,70	3		B	C	D
0	0	Filial	248,90	3			C	D
0	1	Eclipse	240,40	3				D

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Salida InfoStat para el Rendimiento en g m⁻² año 2008:

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
REND 2008	24	0,83	0,75	15,02

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	233791,36	7	33398,77	10,92	<0,0001
N	230829,32	1	230829,32	75,46	<0,0001
S	228,78	1	228,78	0,07	0,7880
Genotipo	865,20	1	865,20	0,28	0,6021
N*S	668,87	1	668,87	0,22	0,6464
N*Genotipo	889,38	1	889,38	0,29	0,5972
S*Genotipo	308,88	1	308,88	0,10	0,7548
N*S*Genotipo	0,92	1	0,92	3,0E-04	0,9864
Error	48941,41	16	3058,84		
Total	282732,78	23			

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=47,86510

Error: 3058,8383 gl: 16

N	Medias	n	
1	466,23	12	A
0	270,09	12	B

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=47,86510

Error: 3058,8383 gl: 16

S	Medias	n	
1	371,25	12	A
0	365,08	12	A

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0,05$)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=47,86510

Error: 3058,8383 gl: 16

Genotipo	Medias	n	
Filial	374,17	12	A
Eclipse	362,16	12	A

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0,05$)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=67,69148

Error: 3058,8383 gl: 16

N	S	Medias	n	
1	1	474,60	6	A
1	0	457,87	6	A
0	0	272,28	6	B
0	1	267,90	6	B

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0,05$)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=67,69148

Error: 3058,8383 gl: 16

N	Genotipo	Medias	n	
1	Eclipse	466,32	6	A
1	Filial	466,15	6	A
0	Filial	282,18	6	B
0	Eclipse	258,00	6	B

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0,05$)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=67,69148

Error: 3058,8383 gl: 16

S	Genotipo	Medias	n	
0	Filial	374,67	6	A
1	Filial	373,67	6	A
1	Eclipse	368,83	6	A
0	Eclipse	355,48	6	A

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0,05$)

Test:LSD Fisher Alfa:=0,05 DMS:=95,73020

Error: 3058,8383 gl: 16

N	S	Genotipo	Medias	n	
1	1	Eclipse	478,47	3	A
1	1	Filial	470,73	3	A
1	0	Filial	461,57	3	A
1	0	Eclipse	454,17	3	A
0	0	Filial	287,77	3	B
0	1	Filial	276,60	3	B
0	1	Eclipse	259,20	3	B
0	0	Eclipse	256,80	3	B

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0,05$)

Anexo 5

Ecuaciones de la relación entre el rendimiento relativo al máximo rendimiento con fertilización y el nitrógeno disponible (kg ha^{-1}) para distintas fuentes bibliográficas:

1. Este trabajo

$$\text{Rendimiento Relativo} = 53,42 + 0,396 \text{ N Disp} - 0,000809 \text{ N Disp}^2$$
$$R^2=0,69$$

2. Dreccer *et al.*, 2000

$$\text{Rendimiento Relativo} = -10,62 + 0,78 \text{ N Disp}$$
$$R^2=0,99; p=0,0432$$

3. Hocking *et al.*, 1997

Greenethorpe (GR)

$$\text{Rendimiento Relativo} = 53,36 + 0,717 \text{ N Disp} - 0,002606 \text{ N Disp}^2$$
$$R^2=0,98$$

Canowindra (CA)

$$\text{Rendimiento Relativo} = 9,94 + 1,218 \text{ N Disp} - 0,004053 \text{ N Disp}^2$$
$$R^2=0,95$$

4. Gambaudo y Fontanetto, 2008

Rafaela (RA) y C. Pellegrini (CP) en conjunto

$$\text{Rendimiento Relativo} = 51,53 + 0,420 \text{ N Disp} - 0,0008896 \text{ N Disp}^2$$
$$R^2=0,95$$